



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Clayton Geovane de Souza

**Tratamento e análise de dados de ensaios de fadiga axial do aço AISI 316L  
processado por manufatura aditiva**

Joinville

2022

Clayton Geovane de Souza

**Tratamento e análise de dados de ensaios de fadiga axial do aço AISI 316L  
processado por manufatura aditiva**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Alexandre Mikowski, Dr.  
Coorientador: Prof. Rafael Machado Casali, Dr.

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Clayton Geovane de  
Tratamento e análise de dados de ensaios de fadiga  
axial do aço AISI 316L processado por manufatura aditiva /  
Clayton Geovane de Souza ; orientador, Alexandre  
Mikowski, coorientador, Rafael Machado Casali, 2022.  
87 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. AISI 316L. 3.  
Manufatura Aditiva. 4. Curva S-N. 5. Fadiga. I. Mikowski,  
Alexandre. II. Casali, Rafael Machado. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Ciências Mecânicas. IV. Título.

Clayton Geovane de Souza

**Tratamento e análise de dados de ensaios de fadiga axial do aço AISI 316L  
processado por manufatura aditiva**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por uma banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Breno Salgado Barra, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Silvio Buchner, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado  
adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Profº Roberto Simoni, Dr.

Subcoordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Orientador

Joinville, 2022

A minha família, amigos, e todos que sempre  
acreditaram em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus, pela graça da vida e pelos caminhos a que fui conduzido por sua divina providência.

Aos meus pais por mostrarem que somente pela educação, honestidade e trabalho é possível atingir nossos objetivos.

Aos meus professores que ao longo de toda minha vida, contribuíram na formação de meu conhecimento técnico e humano. Em especial ao meu orientador Alexandre Mikowski, por toda a dedicação e credibilidade na consolidação deste trabalho.

À minha esposa Carina, e meus filhos Davi e Camile, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência.

Ao Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser, por toda a infraestrutura e suporte que tornou possível a realização deste trabalho. Em especial ao meu líder técnico Dr. Jhonattan Gutjhar, por ter me instigado e motivado para realização deste estudo.

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende. (*Leonardo da Vinci*)

## RESUMO

O crescimento da manufatura aditiva de materiais metálicos no cenário mundial, dado pelo interesse das indústrias pela tecnologia e todas as suas possibilidades, tem resultado em muitos estudos envolvendo os diferentes processos e materiais. As possibilidades de utilização de peças manufaturadas por este método, passam necessariamente pelo conhecimento das propriedades mecânicas necessárias para projetar estes componentes. Com isso, muitos estudos surgiram com o intuito de determinar as propriedades mecânicas de peças elaboradas por manufatura aditiva, comparando-as com componentes confeccionados por métodos tradicionais, objetivando comprovar a possibilidade de substituição da tecnologia, sem detrimento das suas propriedades mecânicas. Porém, uma grande parcela destes estudos, caracterizam os materiais por ensaios mecânicos como tração e impacto, deixando de contemplar fenômenos relacionados à esforços repetitivos como fadiga, por exemplo, determinados por ensaios dinâmicos. Neste trabalho foram executados ensaios de fadiga axial, conduzidos conforme ASTM E466-21 (ASTM, 2021b), em corpos de prova produzidos por manufatura aditiva, utilizando o método de deposição direta à laser, L-DED, com aço inoxidável AISI 316L, na forma de pó metálico. Foram produzidos 32 corpos de prova, dos quais 3 foram descartados, utilizando os resultados de 29 deles. Os resultados de fadiga foram apresentados na forma de curva tensão *versus* número de ciclos (*S-N*), determinando a equação e os coeficientes. Além disso, foi determinado o Limite de Resistência à Fadiga, LRF, usando o método *Staircase*, obtendo o resultado de 174,50 MPa, com desvio padrão de 14,56 MPa. Também foram executados ensaios de tração em 6 corpos de prova produzidos simultaneamente aos de fadiga, obtendo a média de 610 MPa, para o limite de resistência à tração, LRT, sendo este resultado usado como referência para a determinação dos níveis de tensão utilizados para o ensaio de fadiga. Como análise complementar, foram executadas fractografias, em duas amostras, uma submetida à tensão de 360 MPa, e outra com tensão de 182 MPa, classificadas como baixo e alto ciclo, respectivamente. As fractografias mostraram significativas diferenças entre os corpos de prova considerados de alto e baixo ciclo, como esperado. Também foram levantados os custos para a execução dos ensaios de fadiga, incluindo custo do pó metálico, da fabricação e usinagem dos corpos de prova, assim como a execução dos ensaios de fadiga, que somaram um total de R\$ 74.327,55. Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que o aço AISI 316L processado pelo método de deposição direta a laser, apresenta bom comportamento mecânico nos ensaios estáticos. Porém em relação à fadiga, seu desempenho mostrou-se um pouco abaixo de valores encontrados na literatura, quando comparado a outros processos de manufatura aditiva e também com métodos de produção convencionais.

**Palavras-chave:** AISI 316L; Manufatura aditiva; Deposição direta a laser; Fadiga.



## ABSTRACT

The increase of additive manufacturing of metallic materials in the world scenario, due to interest of industries in the technology and all its possibilities, has resulted in many studies involving different processes and materials. The possibilities of using parts manufactured by this method necessarily involve knowledge of the mechanical properties required to design these components. Thus, many studies have emerged with the aim of determining the mechanical properties of parts made by additive manufacturing, comparing them with components manufactured by traditional methods, aiming to prove the possibility of replacing the technology, without detriment to its necessary mechanical properties. However, a large portion of these studies characterize materials by mechanical tests, such as traction and impact, failing to contemplate phenomena related to cyclics requirement such as fatigue, for example, determined by dynamic tests. Thus, this study aimed to perform axial fatigue tests were carried out, conducted in accordance with ASTM E466-21 (ASTM, 2021b), on specimens produced by additive manufacturing, using the direct laser deposition method, L-DED, with AISI 316L stainless steel, in the form of metallic powder. 32 specimens were produced, of which 3 were discarded, using the results of 29 of them. The fatigue results were presented in the form of a stress versus number of cycles curve (S-N), determining the equation and coefficients. In addition, the Fatigue Resistance Limit, LRF, was determined using the Staircase method, obtaining a result of 174.50 MPa, with a standard deviation of 14.56 MPa. Tensile tests were also performed on 6 specimens produced simultaneously with the fatigue specimens, obtaining an average of 610 MPa, for the tensile strength limit, LRT, this result being used as a reference for determining the stress levels used for the fatigue test. As a complementary analysis, fractographs were performed on two samples, one subjected to a tension of 360 MPa, and the other with a tension of 182 MPa, classified as low and high cycle, respectively. The fractographs showed significant differences between the specimens considered of high and low cycle, as expected. The costs for carrying out the fatigue tests were also determined, including the cost of the metallic powder, the cost of manufacturing and machining the test specimens, as well as the execution of the fatigue tests, which added up to a total of R\$ 74,327.55. Based on the results obtained, it can be said that the AISI 316L steel processed by the direct laser deposition method presents good mechanical behavior in static tests. However, in relation to fatigue, its performance was slightly below the values found in the literature, when compared to other additive manufacturing processes and also to conventional production methods.

**Keywords:** AISI 316L; Additive manufacturing; Laser direct deposition, Fatigue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultado da pesquisa na plataforma Scopus. ....	18
Figura 2 – Esquema com diferentes classes do aço inoxidável austenítico. ....	22
Figura 3 – Esquema dos diferentes métodos de deposição direta de metais a laser (LMD). (a) deposição com alimentação por fita ou fio metálico (b) deposição com uso de pó metálico. ....	25
Figura 4 – Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica: (a) peças complexas com detalhes não seriam possíveis de obter com métodos convencionais de manufatura; (b) Suporte projetado para alívio de massa. ....	26
Figura 5 – Exemplo de otimização topológica utilizando MA, em carcaças de sistema de freios, representados em modelos digitais em SolidWorks, sendo (a) e (b), os modelos originais dianteiro e traseiro, respectivamente, (c) e (d) os modelos otimizados. ....	27
Figura 6 – Pedal de freio automotivo fabricado em Aço inoxidável AISI 316L, produzido por manufatura aditiva. ....	28
Figura 7 – Exemplos de diferentes implantes de fêmur personalizados. ....	29
Figura 8 – Exemplo de células unitárias de estruturas treliçadas ( <i>lattice structures</i> ). ....	29
Figura 9 – Exemplos de: (a) Curva de Wöhler ou Curva S-N, (b) Ensaios de fadiga: flexão rotativa, axial e torção. ....	30
Figura 10 – Tipos de carregamento aplicado à fadiga. ....	32
Figura 11 – Esquema de equipamento para ensaio de flexão rotativa. ....	33
Figura 12 – Exemplos de curvas $\sigma$ -N (S-N), determinadas pelos métodos padrão (a) e tensão constante (b). ....	34
Figura 13 – Amplitude de tensão (S) em função do logaritmo do número de ciclos até a falha por fadiga (N) para (a) um material que exibe limite de resistência à fadiga e (b) uma material que não exibe este limite. ....	35
Figura 14 – Apresentação dos resultados do ensaio de fadiga por meio de curvas de probabilidade constante. ....	37
Figura 15 – Exemplo de curva S-N com ensaios por nível de tensão e resistência média à fadiga pelo método <i>Staircase</i> . ....	39
Figura 16 – Imagem do pó metálico AISI 316L, utilizado para confecção dos corpos de prova. ....	45
Figura 17 – Distribuição granulométrica do pó metálico do aço AISI 316L. ....	46

Figura 18 – Desenho esquemático de um atomizador a gás. ....	48
Figura 19 – Lote do pó metálico do aço AISI 316L, utilizado para a confecção dos corpos de prova.....	48
Figura 20 – Esquema de processo de deposição direta a laser, L-DED. ....	49
Figura 21 – (a) Máquina de deposição a Laser modelo RPMI 535. Detalhe interno mostrando a mesa de deposição (b) e bicos do cabeçote de deposição (c).....	50
Figura 22 – Deposição do <i>built</i> de fabricação dos corpos de prova. ....	52
Figura 23 – Substrato com todos os corpos de prova após deposição. ....	52
Figura 24 – Retirada dos corpos de prova do substrato pelo processo de eletroerosão a fio. ....	53
Figura 25 – Corpo de prova com raio contínuo para ensaio de fadiga, conforme Norma ASTM E466-21 (2021b). ....	53
Figura 26 – Corpos de prova de fadiga na condição <i>as-built</i> e após usinagem final.	54
Figura 27 – Projetor de perfil utilizado para medição do diâmetro final do corpo de prova de fadiga.....	55
Figura 28 – Equipamento de ensaios dinâmicos INSTRON modelo 8801. ....	56
Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de tração estática.....	58
Figura 30– Representação gráfica da metodologia <i>Staircase</i> . ....	60
Figura 31 – FEG utilizado para a microscopia eletrônica. ....	61
Figura 35 – Representação gráfica dos resultados obtidos pelo método <i>Staircase</i> . .	67
Figura 32 – Fractografia da amostra CP 18, que foi submetido a uma tensão de 182 MPa. (a) Defeito aparente no ponto de nucleação da trinca, (b) Região de propagação estável com a presença de estrias de fadiga, (c) Ruptura catastrófica, com a presença de <i>dimples</i> característicos de fraturas dúcteis.....	71
Figura 33 – Fractografia amostra CP 6, submetida a uma tensão de 360 MPa. (a) Defeito aparente na região de nucleação da trinca; (b) Região de propagação estável, caracterizada pela presença de estrias de fadiga; (c) Região de fratura catastrófica, com <i>dimples</i> característicos de fratura dúctil.....	72
Figura 34 – Fractografia do corpo de prova 25, submetido a uma tensão de 167 MPa. Onde vemos: a) as regiões de nucleação, propagação e ruptura; b) defeito no ponto de iniciação da trinca; c) detalhe de partícula não fundida.....	73
Figura 36 – Curva Log(S) x Log(N), para os dados de fadiga. ....	75
Figura 37 – Curva S-N para o aço inoxidável AISI 316L, produzido por manufatura aditiva. ....	76

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pesquisa bibliográfica na biblioteca online Scopus. O total para documentos selecionados desconsidera os documentos repetidos para os 3 conjuntos de palavras-chave. ....	40
Quadro 2 – Quesitos propostos e verificados em cada artigo científico. ....	41
Quadro 3 – Informações qualitativas e quantitativas referentes as Questões do Quadro 2 para os artigos científicos selecionados. ....	42
Quadro 4 – Indicação do percentual de replicação para cada tipo de estudo. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados no analisador de partícula <i>Particle Insight</i> .....	46
Tabela 2 – Composição química do pó utilizado no estudo. ....	47
Tabela 3 – Parâmetros de deposição e fabricação dos corpos de prova.....	51
Tabela 4 – Dimensões adotadas para os corpos de prova. ....	54
Tabela 5 – Níveis de tensão e número de corpos de prova. ....	57
Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração estática, conforme Norma ASTM E8/E8M-16 (2016). ....	58
Tabela 7 – Parâmetros método <i>Up-and-Down</i> . ....	60
Tabela 8 – Resultados de ensaios de tração quase-estáticos. ....	62
Tabela 9 – Percentual dos níveis de tensão em relação ao LRT. ....	63
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do aço AISI 316L processado por manufatura aditiva, segundo alguns autores.....	63
Tabela 11 – Resultados brutos obtidos nos ensaios de fadiga. ....	64
Tabela 12 – Análise estatística dos resultados de fadiga, frequência de 3 Hz, para n=14. ....	65
Tabela 13 – Análise estatística dos resultados de fadiga, frequência de 30 Hz, para n=15. ....	65
Tabela 14 – Resultados obtidos para metodologia <i>Staircase</i> . ....	66
Tabela 15 – Ocorrência de rupturas ou 10 milhões de ciclos.....	67
Tabela 16 – Varáveis utilizadas para determinação do LRF .....	68
Tabela 17 – Tempos de fabricação dos corpos de prova.....	77
Tabela 18 – Custo de impressão dos corpos de prova pelo processo L-DED. ....	77
Tabela 19 – Custo e quantidade de pó metálico utilizado para convecção dos CP's. ....	78
Tabela 20 – Custo do ensaio de fadiga axial.....	78
Tabela 21 – Custo total do estudo.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AISI	American Iron and Steel Institute.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CP	Corpo de Prova.
Cr	Elemento químico cromo.
FEG	Field Emission Gun.
Fe	Elemento químico ferro.
H	Elemento químico hidrogênio.
ISI/Laser	Instituto SENAI de Inovação em Processamento a Laser.
LATECME	Laboratório de Tecnologia Mecânica.
LCF/HCF	Low / High Cycle Fatigue.
L-DED	Laser Direct Energy Deposition.
LE	Limite de Escoamento.
LMD	Laser Metal Deposition.
LRF	Limite de Resistência à Fadiga.
LRT	Limite de Resistência à Tração.
MA	Manufatura Aditiva.
<i>N</i>	Número de ciclos.
N	Elemento químico nitrogênio.
Ni	Elemento químico níquel.
O	Elemento Químico Oxigênio.
S	Tensão.
SXXXXX <sup>1</sup>	Aço inoxidável classe dos ferrítico-austeníticos (duplex).
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina.
UNS	Unified Numbering System.
3XXL	Aço inoxidável, classe dos austeníticos, com baixo teor de carbono (L).
3XX	Aço inoxidável classe dos austeníticos.
4XX	Aço inoxidável classe ferríticos e martensíticos.
MPa	Megapascal.
VIM	Vacuum Induction Melting.

---

<sup>1</sup> As letras “X”, representam algarismos de 0 à 9, que indicam os diferentes tipos dentro de uma mesma classe.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
3.1	AÇO INOXIDÁVEL.....	20
<b>3.1.1</b>	<b>Definições gerais do aço inoxidável</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Aplicações para o aço inoxidável</b> .....	<b>23</b>
3.2	MANUFATURA ADITIVA (MA).....	24
<b>3.2.1</b>	<b>Definições gerais da manufatura aditiva</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Aplicações da manufatura aditiva</b> .....	<b>26</b>
3.3	FADIGA DE MATERIAIS METÁLICOS.....	29
<b>3.3.1</b>	<b>Tipos de carregamento</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Curva de Wöhler ou curva S-N</b> .....	<b>33</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Resultados do ensaio de fadiga</b> .....	<b>36</b>
3.4	ESTUDOS DE FADIGA PARA O AÇO AISI 316L FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA.....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
4.1	PÓ METÁLICO AISI 316L.....	44
4.2	PROCESSO L-DED .....	49
4.3	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	51
4.4	ENSAIOS MECÂNICOS DE FADIGA AXIAL .....	55
<b>4.4.1</b>	<b>Método <i>Staircase</i> ou <i>Up-and-Down</i></b> .....	<b>59</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Análise de dados e tratamento estatístico</b> .....	<b>60</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Fractografia</b> .....	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>62</b>
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS POR TRAÇÃO UNIAXIAL.....	62
5.2	DADOS OBTIDOS COM TESTES DE FADIGA AXIAL.....	64
5.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO STAIRCASE AOS TESTES DE FADIGA AXIAL .....	66
5.4	FRACTOGRAFIAS.....	69

5.5	LINEARIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N OBTIDA PARA OS DADOS DOS TESTES DE FADIGA AXIAL.....	74
5.6	CUSTOS DO PROJETO.....	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXO A – ORÇAMENTO PARA OS PROCESSOS DE IMPRESSÃO E ENSAIOS DE FADIGA.....</b>	<b>86</b>
	<b>ANEXO B – CERTIFICADO FORNECIDO PELO FABRICANTE DO PÓ AISI 316L.....</b>	<b>87</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva de materiais metálicos, comumente conhecida como impressão 3D, tem-se demonstrado capaz de alterar significativamente projetos de vários setores industriais, que já enxergam nesta tecnologia, a possibilidade de melhorias significativas nos projetos. Além disso, a Manufatura Aditiva (MA) vem ganhando ainda mais destaque, por ser um dos pilares da chamada indústria 4.0, juntamente com a IoT (*Internet of Things*), *Big Data*, robótica, inteligência artificial, entre outras (CERUTI *et al.*, 2019).

A possibilidade de obtenção de geometrias complexas e a produção de peças conforme a demanda, reduzindo o tempo de espera para um componente crítico ou obsoleto, são fatores que têm atraído o olhar da indústria para a tecnologia. Outro aspecto importante a ser levado em conta, é o fato do custo de um componente fabricado por esta tecnologia ser constante, diferentemente de processos convencionais, como fundição e conformação, por exemplo, que apresentam um baixo custo por peça, no entanto tornam-se inviáveis para produção de poucas unidades (KUMAR *et al.*, 2021).

Inicialmente mais difundida no uso em prototipagem rápida, a manufatura aditiva de materiais metálicos evoluiu à medida que foram se desenvolvendo mais ligas metálicas processáveis por este método, ampliando-se ainda mais sua aplicação, sendo atualmente utilizada em diversas indústrias (HANNIBAL; KNIGHT, 2018).

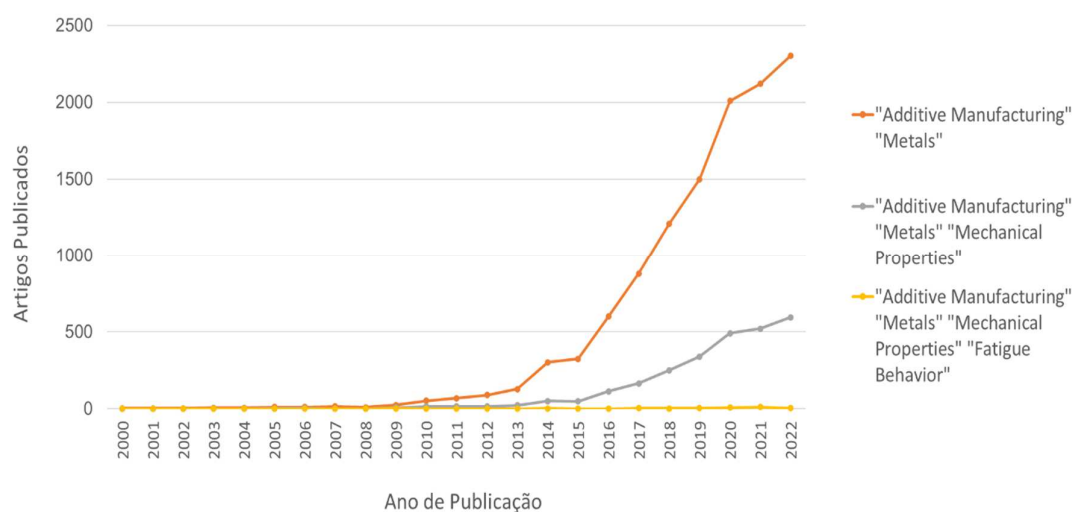
Com isso, fica evidente que estudos mais aprofundados e abrangentes da microestrutura e das propriedades mecânicas de ligas metálicas, fabricadas pelos diversos métodos de manufatura aditiva, ainda se mostram necessários para uma compreensão mais aprofundada dos diversos fenômenos envolvidos no processo de fabricação.

A maioria dos estudos sobre propriedades mecânicas apresentados na área de manufatura aditiva, são relativos a ligas de titânio, processados por fusão em leito de pó (L-PBF), normalmente resultados obtidos por ensaios de tração e compressão, por serem relativamente mais baratos e mais disponíveis do que ensaios dinâmicos. Com isso, estudos relacionados à fadiga e mecânica da fratura, por exemplo, ainda se fazem necessários (LEWANDOWSKI; SEIFI, 2016).

A Figura 1 apresenta os resultados para uma análise bibliométrica inicial de artigos publicados na plataforma Scopus, no período de 2000 até 2022, com filtro para artigos científicos em periódicos. Os termos utilizados para a pesquisa foram:

- i) “Additive Manufacturing” AND “Metals”;
- ii) “Additive Manufacturing” AND “Metals” AND “Mechanical Properties”;
- iii) “Additive Manufacturing” AND “Metals” AND “Mechanical Properties” AND “Fatigue Behavior”.

Figura 1 – Resultado da pesquisa na plataforma Scopus.



Fonte: Plataforma Scopus (2022).

Verifica-se que apesar de um crescimento nos estudos sobre MA, e propriedades mecânicas, os estudos envolvendo fadiga, não apresentam a mesma taxa de crescimento, demonstrando a necessidade de pesquisas avançadas sobre a ótica dos fenômenos cíclicos de carregamento mecânico.

Dentro do contexto exposto, a seguir os objetivos desse trabalho serão apresentados.

## 2 OBJETIVOS

Neste capítulo, serão apresentados os objetivos geral e específicos deste estudo.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Tratar e analisar os resultados obtidos pelos ensaios mecânicos de fadiga axial em corpos de prova de aço inoxidável AISI 316L, produzidos por manufatura aditiva pelo método de deposição direta à laser (L-DED), determinando a curva S-N e o limite de resistência à fadiga.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Fabricar corpos de prova de aço inoxidável AISI 316L, utilizando a tecnologia de manufatura aditiva de deposição direta à laser, L-DED, tendo como matéria-prima pó metálico com granulometria entre 50-150  $\mu\text{m}$ ;
- ii) Executar ensaios mecânicos de tração, em corpos de prova usinados, conforme Norma ASTM E8/E8M-16 (ASTM, 2016), para determinação do Limite de Resistência à Tração;
- iii) Executar ensaios dinâmicos de fadiga, em corpos de prova usinados, conforme Norma ASTM E466-21 (ASTM, 2021b), com razão de carga  $R=-1$ , para obtenção dos dados de tensão *versus* número de ciclos;
- iv) Determinar a Limite de Resistência à Fadiga, LRF, utilizando a metodologia *Staircase*, considerando como resistentes aos ciclos, os corpos de prova que atingirem 10 milhões de ciclos;
- v) Tratar e analisar os resultados, representando-os como uma curva tensão *versus* em função do número de ciclos, ou curva S-N, para os níveis de tensão usados, utilizando tratamento estatístico;
- vi) Selecionar algumas fraturas, para com a ajuda de microscopia eletrônica, avaliar o comportamento da propagação desta trinca;
- vii) Levantar os custos envolvidos na obtenção dos corpos de prova por manufatura aditiva e execução dos ensaios de fadiga.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão apresentados neste capítulo conceitos relacionados ao aço inoxidável, manufatura aditiva e fadiga de materiais metálicos.

#### 3.1 AÇO INOXIDÁVEL

A seção seguinte apresenta as definições gerais sobre o aço inoxidável, bem como sua aplicação.

##### 3.1.1 Definições gerais do aço inoxidável

Aços inoxidáveis são ligas a base de ferro (Fe) e cromo (Cr) com um mínimo de 10,5 % de Cr, além de outros elementos como carbono (C), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) (CARBÓ, 2008).

Estes aços são de grande aplicação na engenharia, principalmente por propriedades que vão além da sua resistência à corrosão, como resistência mecânica em altas temperaturas, soldabilidade e tenacidade.

A resistência à corrosão de ligas a base de Fe-Cr está associada ao fenômeno de passivação, que consiste na formação de um filme de óxidos mistos (de ferro, cromo e outros elementos de liga) e a dissolução dessa camada no meio corrosivo. A formação ou não dessa camada, sua impermeabilidade e a sua taxa de dissolução no meio corrosivo controlarão a resistência à corrosão do material no meio corrosivo em questão. Além da consideração da corrosão uniforme, ou generalizada, a prevenção de fenômenos de corrosão localizada é, também, muito importante para o desempenho satisfatório dos aços inoxidáveis (SILVA; MEI, 2006).

As composições mais comuns de aços inoxidáveis, por exemplo 12% Cr e 18% Cr + 8% de Ni, foram desenvolvidas acidentalmente no começo do século XX. A partir destas composições, foram estudados os efeitos de diversos elementos de liga e residuais como carbono, nitrogênio, molibdênio etc. Com base nestes estudos, novas composições vêm sendo desenvolvidas. Tendo a microestrutura efeito dominante sobre as propriedades mecânicas, os aços inoxidáveis são classificados com base em sua microestrutura a temperatura ambiente. Para fins de classificação

e discussão de suas propriedades, os aços inoxidáveis são agrupados basicamente em cinco categorias (SILVA; MEI, 2006):

1. Martensíticos – São ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono em geral acima de 0,1%. Mais recentemente, entretanto, estão sendo desenvolvidos e usados os aços chamados de “supermartensíticos”, os quais possuem carbono abaixo de 0,1% e baixíssimos teores de elementos residuais. Essas composições interceptam o campo austenítico no diagrama de fases sendo, portanto, endurecíveis por tratamento térmico de têmpera. São também magnéticos. Incluem-se nesta família os aços AISI 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C, 501. Uma classe intermediária, aqui agrupada com os aços martensíticos é a dos aços martensítico-austeníticos (ou martensítico-ferríticos), que são composições mas ricas em níquel do que os aços martensíticos, permitindo obter transformação parcial no endurecimento por têmpera.

2. Ferríticos – São ligas Fe-Cr essencialmente ferríticas a todas as temperaturas e que não endurecem por tratamento térmico de têmpera. Normalmente têm teores de cromo mais elevados do que os aços martensíticos e têm naturalmente, menores teores de carbono. Os principais graus são: AISI 405, 430, 430F, 446, 502.

3. Austeníticos – São ligas à base de ferro e cromo (16-30%) e níquel (8-35%) predominantemente austeníticas após tratamento térmico comercial. Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns entre os aços inoxidáveis. Caracterizam-se pela excelente resistência à corrosão, elevada tenacidade, boa soldabilidade além de não serem magnéticos. A austenita, caracterizada pela estrutura cúbica de face centrada (CFC), é estabilizada à temperatura ambiente pela adição de níquel e outros estabilizadores dessa estrutura, como manganês, por exemplo. A estrutura austenítica apresenta bom desempenho tanto em temperaturas criogênicas, por não apresentar transição dúctil-frágil, quanto em altas temperaturas, por sua elevada resistência à deformação a quente. Incluem-se nesta família: AISI 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347. O teor de carbono é, em geral, inferior a 0,08%. Outros aços inoxidáveis austeníticos incluem aqueles em que, por questão de custo, parte do níquel é substituído por manganês ou nitrogênio (elementos estabilizadores de austenita). Exemplo: AISI 201, 202 e 204. Segundo Carbó (2008), conforme representação gráfica da Figura 2 partindo da composição do aço AISI 304 e, variando



baixo carbono, pela precipitação de compostos intermetálicos (alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio).

### 3.1.2 Aplicações para o aço inoxidável

Levando-se em consideração as propriedades já destacadas, o aço inoxidável encontra aplicação nos mais diversos ramos da indústria. A relação custo-benefício, atrelado a propriedades importantes como resistência à corrosão, por exemplo, coloca o aço inoxidável dentre os materiais metálicos mais utilizados.

Cerca de 20% da produção mundial de aço é perdida devido à corrosão, e além disso, aproximadamente 1% a 5% do Produto Interno Bruto (PIB) dos países é utilizado com gastos provenientes de efeitos corrosivos. Os equipamentos para aplicação na indústria petroquímica, em especial, são susceptíveis a diversas formas de corrosão, como a ação de íons cloreto provenientes da água do mar, corrosão sob tensão em equipamentos submetidos a cargas mecânicas, ação corrosiva de ácido sulfúrico e dióxido de carbono na extração do petróleo e corrosão microbológica, devido a microrganismos existentes no oceano (LUIZ *et al.*, 2020).

Dentre os aços inoxidáveis mais utilizados na indústria petroquímica, destacam-se o AISI 304, pela sua excelente resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade. Em certas aplicações, a opção pelo AISI 316 acaba sendo considerada, haja visto que o 304 acaba sendo um pouco mais susceptível a ação de íons cloreto (CARBÓ, 2008). Os aços inoxidáveis são muito utilizados na fabricação de válvulas, flanges, tanques de contenção, dutos etc.

Outra característica importante no aço inoxidável é sua biocompatibilidade ou a propriedade de ser compatível com tecido humano. O aço inoxidável é um material muito utilizado para fixações de fraturas ósseas, pois sua biocompatibilidade está provada devido ao uso durante várias décadas. Além disso, demonstra uma boa combinação de resistência mecânica, ductilidade, custo e facilidade de fabricação. O seu uso em cirurgias ortopédicas abriu uma vasta faixa de novas possibilidades de outras aplicações. O aço inoxidável austenítico, ASTM F138-19 (2019), classe especial do aço AISI 316L para aplicações médicas, é o material mais amplamente utilizado em implantes ortopédicos (GIORDANO *et al.*, 2010).

Na indústria automotiva o aço inoxidável inicialmente encontrou aplicação em componentes com aspectos mais estéticos como maçanetas e frisos, devido à

aparência. Porém o surgimento dos cromados acabou inibindo esta aplicação (MEDINA; NAVEIRO 2001).

Atualmente a maior aplicação dos aços inoxidáveis em automóveis está no sistema de exaustão, principalmente pelas boas propriedades térmicas (à quente), além da resistência à corrosão (ZHAN *et al.*, 2021).

Outra interessante aplicação para os aços inoxidáveis, está nos sistemas de geração de hidrogênio como combustível. Estudo apresentado por Gallina, Dias e Rodrigues (2014), indicam vantagens principalmente econômicas, na substituição dos eletrodos de platina, utilizados no processo.

### 3.2 MANUFATURA ADITIVA (MA)

Esta seção apresenta as definições gerais da manufatura aditiva e sua aplicação na indústria.

#### 3.2.1 Definições gerais da manufatura aditiva

A Manufatura Aditiva (MA) está definida, segundo a Norma ISO/ASTM 52900-21 (ASTM, 2021c), como “um processo de união de materiais, para criar peças a partir de um modelo 3D, geralmente camada à camada em oposição à fabricação subtrativa e outras metodologias de fabricação.”

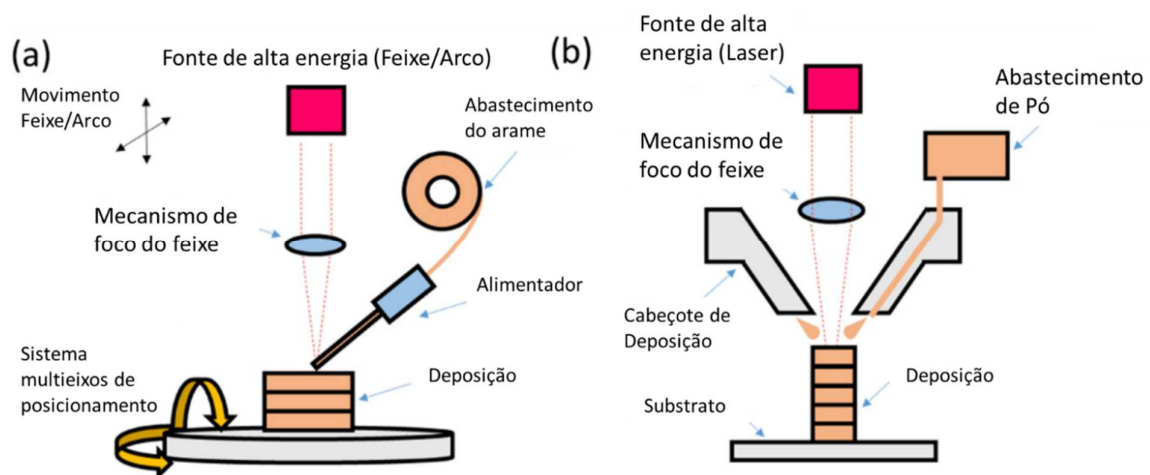
Dentre os processos de manufatura aditiva para metais, está a deposição de metais a laser, tradução do termo *Laser Metal Deposition* (LMD), caracterizado pela Norma ISO/ASTM 52900-21 (ASTM, 2021c), como uma técnica de deposição direta de energia (*Direct Energy Deposition* – DED).



Neste processo, um pó, arame ou fita metálicos são direcionalmente alimentados no foco de uma fonte de energia, consolidando a deposição do material em cordões sobrepostos, formando camadas.

A forma mais comum de alimentação de material no processo LMD é a utilização de pó metálico, o que traz o problema do baixo rendimento metalúrgico do processo, de forma que o aproveitamento de material alimentado é, geralmente, inferior a 50% (TERRASSA *et al.*, 2018). A Figura 3 apresenta um esquema que resume o princípio de funcionamento dos métodos de LMD, sendo que a Figura 3a, mostra um sistema onde o metal de deposição está na forma de arame, e a fonte de energia é um feixe ou arco elétrico. Já na Figura 3b, a fonte de energia é o laser e o metal de deposição se apresenta na forma de pó. A tecnologia de deposição direta a laser, L-DED, será abordada mais adiante na seção 4.2.

Figura 3 – Esquema dos diferentes métodos de deposição direta de metais a laser (LMD). (a) deposição com alimentação por fita ou fio metálico (b) deposição com uso de pó metálico.



Fonte: Adaptado de Kok *et al.*(2018, p.568).

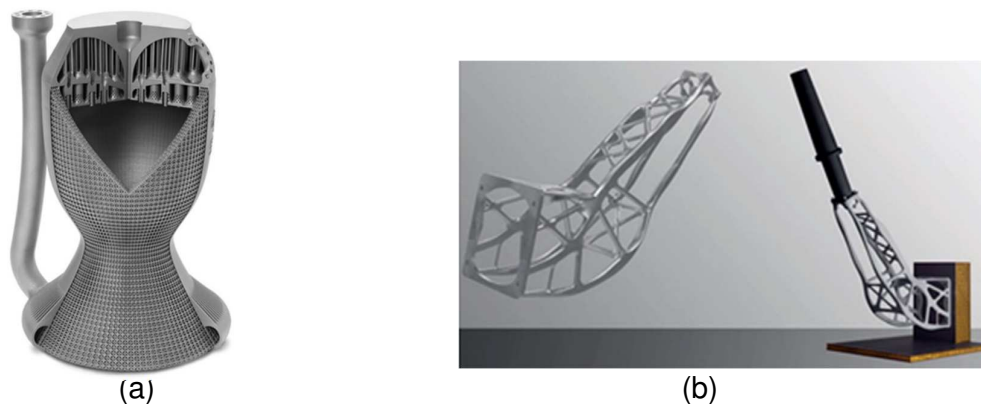
### 3.2.2 Aplicações da manufatura aditiva

Como já citado, a manufatura aditiva tem atraído a atenção da indústria em geral, pois além das vantagens já destacadas, o advento da indústria 4.0 contempla também esta tecnologia.

A indústria aeronáutica, por exemplo, têm sido um dos setores industriais que podem se beneficiar desta nova tecnologia, pois as vantagens em muitas situações, alinham objetivos técnicos e econômicos como desempenho funcional, redução do lead time, redução do peso, complexidade, gerenciamento de custos e sustentabilidade. Portanto, para alinhar todas estas características importantes e altamente interligadas, cada fator deve ser cuidadosamente levado em conta ao selecionar um projeto ideal, sendo que a manufatura aditiva tem-se apresentado como uma considerável solução, sendo viável sua utilização desde componentes complexos, até suportes otimizados para redução de peso (CERUTI *et al.*, 2019). A Figura 4 traz exemplos de projetos desenvolvidos pela indústria aeronáutica.

Estima-se que a manufatura aditiva na indústria aeroespacial aumentará seu tamanho de mercado para US\$ 3,187 bilhões até o ano de 2025, com uma taxa de crescimento anual composta em média de 20,24%. A pesquisa sobre MA no setor aeroespacial, também aumentou exponencialmente na última década, que além da literatura acadêmica, apresenta muitos trabalhos relevantes na forma de relatórios técnicos de fornecedores comerciais aeroespaciais (BLAKEY-MILNER *et al.*, 2021).

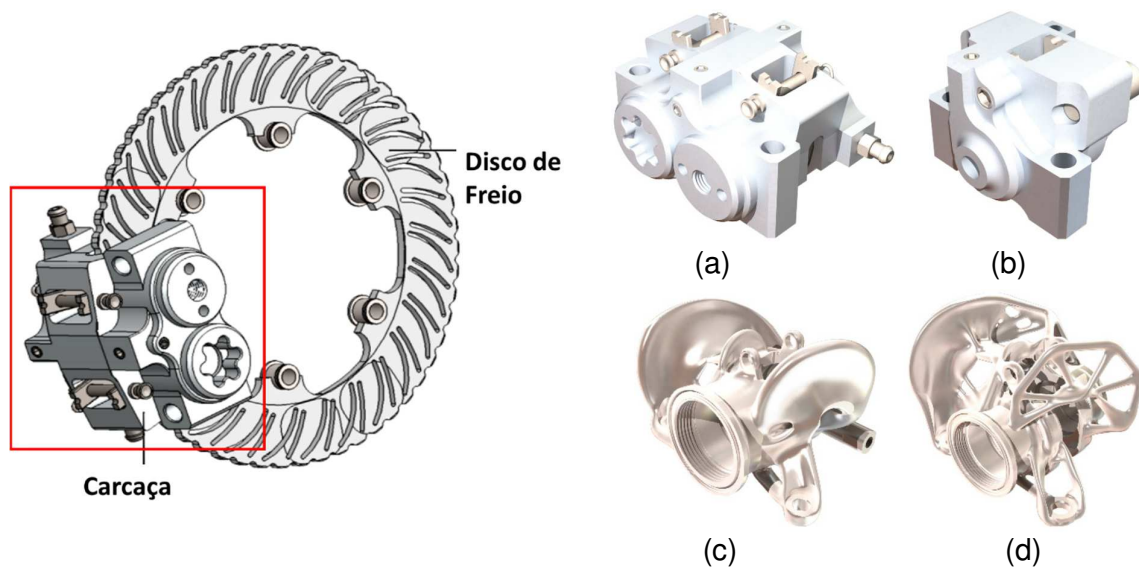
Figura 4 – Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica: (a) peças complexas com detalhes não seriam possíveis de obter com métodos convencionais de manufatura; (b) Suporte projetado para alívio de massa.



Fonte: Blakey-Milner *et al.* (2021, p.9 e 11).

Já a indústria automotiva, que em um âmbito geral possui estruturas de inovação tecnológica mais consolidadas, encontrou na manufatura aditiva uma importante ferramenta para novos desenvolvimentos, trazendo grandes vantagens principalmente no que diz respeito a componentes otimizados para redução de peso. A Figura 5 apresenta um exemplo de otimização em sistemas de freios, utilizando a MA.

Figura 5 – Exemplo de otimização topológica utilizando MA, em carcaças de sistema de freios, representados em modelos digitais em SolidWorks, sendo (a) e (b), os modelos originais dianteiro e traseiro, respectivamente, (c) e (d) os modelos otimizados.



Fonte: Tyflopoulos, Lien e Steinert 2021, p.4, 8 e 10).

Inicialmente, as tecnologias de manufatura aditiva foram empregadas em prototipagem de design e modelagem e, posteriormente, desenvolvidas para ferramentas e fabricação de produtos funcionais. Atualmente, na indústria automotiva, 28,4% da produção de itens usando a tecnologia, são para componentes funcionais de uso final; o restante destina-se principalmente a prototipagem, ferramental e fabricação de moldes, acessórios e pesquisa (WOHLERS, 2019).

Em estudo publicado por Tyflopoulos, Lien e Steinert (2021), a otimização das carcaças de pinças de um sistema de freios dianteiros e traseiros obtiveram reduções de 36,9% e 48,5% do seu peso respectivamente, sem perdas no desempenho do componente, o que mostra que a otimização topológica com o uso

da manufatura aditiva pode render bons resultados, sendo que a redução de peso é relevante haja visto que veículos mais leves, além da melhora de desempenho, também obtém ganho de eficiência e por consequência, redução nas emissões.

Além de peças mais complexas, itens relativamente mais simples também são objetos de projetos inovadores com o uso da manufatura aditiva no setor automotivo, como vimos na indústria aeroespacial. Geralmente estes projetos estão relacionados a redução de peso, sem detrimento de funcionalidade.

Estudo apresentado por Sargini *et al.* (2021), avaliou a possibilidade de implantação da Manufatura Aditiva (AM) para produzir um pedal de freio (Figura 6), analisando os principais aspectos do design, material e fabricação, fazendo uso da liberdade de design que MA permite.

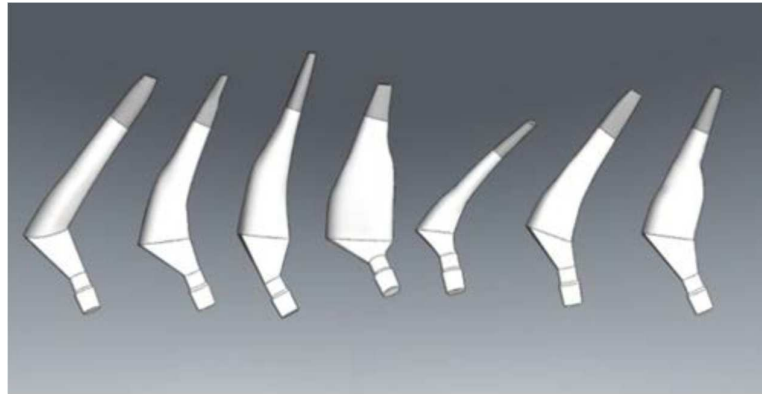
Figura 6 – Pedal de freio automotivo fabricado em Aço inoxidável AISI 316L, produzido por manufatura aditiva.



Fonte: Sargini *et al.* (2021, p. 4602).

Umas das indústrias que mais se beneficiaram e viram na manufatura aditiva uma tecnologia extremamente promissora é a indústria biomédica. A customização de implantes médicos (Figura 7), encontrou um promissor campo para a MA, já que esses itens costumam apresentar baixas taxas de produção e alta complexidade. Os implantes personalizados normalmente são projetados a partir de imagens digitais do paciente (tomografia computadorizada), permitindo assim produção de peças extremamente fiéis (CRONSKÄR; BÄCKSTRÖN; RÄNNAR, 2013).

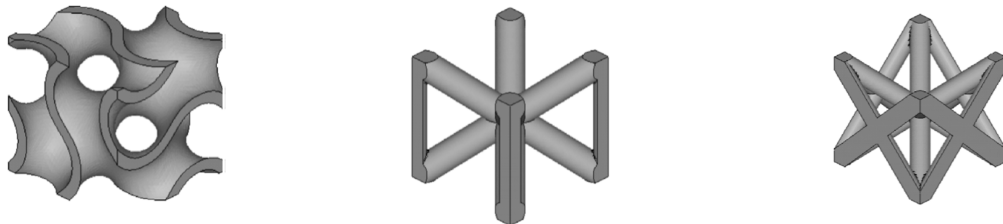
Figura 7 – Exemplos de diferentes implantes de fêmur personalizados.



Fonte: Cronskär; Bäckström; Rännar (2013, p.367).

Outra interessante abordagem para a manufatura aditiva e que tem atraído as indústrias automotivas, são as chamadas estruturas treliçadas, ou *lattice structures*, que consistem em estruturas leves que devida a uma distribuição otimizada dos esforços a que são submetidos, apresentam considerável resistência mecânica, tendo importante aplicação em itens de segurança (NGO *et al.*, 2018).

Figura 8 – Exemplo de células unitárias de estruturas treliçadas (*lattice structures*).



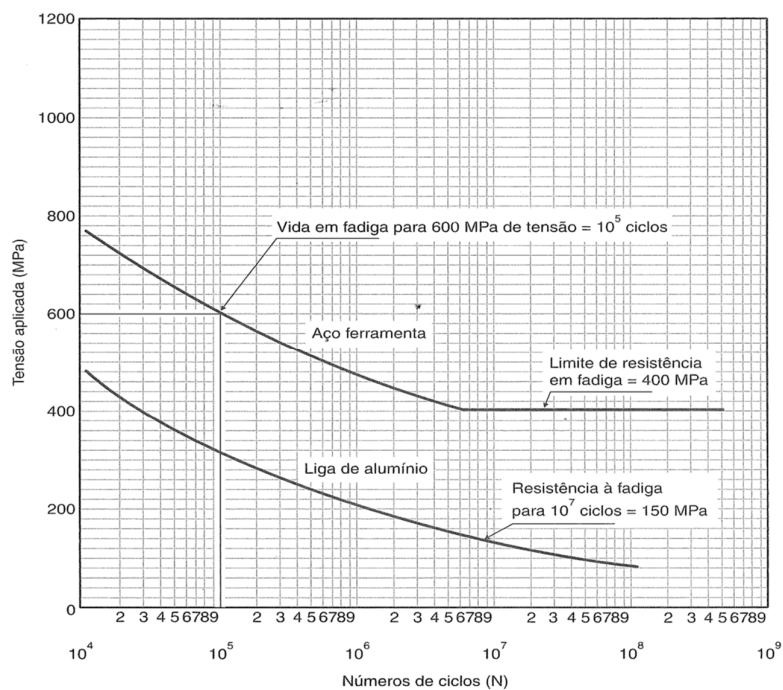
Fonte: Ngo *et al.* (2018, p.188).

### 3.3 FADIGA DE MATERIAIS METÁLICOS

Materiais metálicos quando submetidos a esforços cíclicos e repetitivos tendem a romper em tensões muito abaixo das determinadas por ensaios quase-estáticos (baixa taxa de carregamento). Este fenômeno é chamado de ruptura por fadiga. Estima-se que aproximadamente 90% das falhas de componentes ocorram por fenômenos relacionados à fadiga do material (MILAN *et al.*, 2014).

Os primeiros estudos sobre fadiga de materiais metálicos foram feitos por August Wöhler, na década de 1850. Dentre as informações obtidas por Wöhler, a mais importante foi a representação gráfica dos resultados de fadiga em uma curva que relaciona a tensão versus o número de ciclos, conhecida como curva de Wöhler, ou curva S-N. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). A Figura 9a, apresenta curvas S-N (curva de Wohler), ou seja, a tensão aplicada no corpo de prova em função do número de ciclos para aço ferramenta e liga de alumínio. Verifica-se que à medida que se aumenta a tensão, decresce o número de ciclos para que ocorra a falha por fadiga no material. Já na Figura 9b, estão representados os ensaios de fadiga com esforços de flexão rotativa, tração-compressão axial e torção.

Figura 9 – Exemplos de: (a) Curva de Wöhler ou Curva S-N, (b) Ensaios de fadiga: flexão rotativa, axial e torção.



(a)



(b)

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012, p. 217).

A seguir serão abordados os diferentes tipos de carregamentos cíclicos, o conceito sobre curva de Wöhler ou curva S-N, assim como as formas de apresentação de dados de ensaio de fadiga.

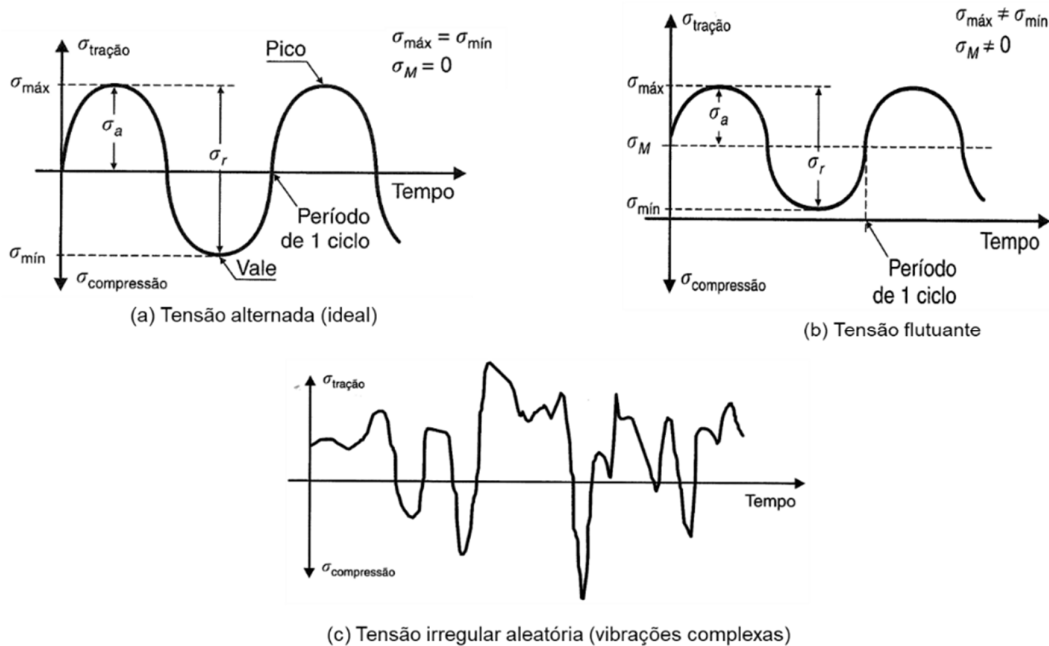
### 3.3.1 Tipos de carregamento

Para analisar o fenômeno de fadiga é importante inicialmente avaliar o tipo de carregamento cíclico a que o componente ou corpo de prova será submetido. A tensão aplicada pode ser axial (tensão-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa), conforme apresentado na Figura 9b.

Basicamente três formas de tensões cíclicas, conforme apresentado na Figura 10, ao longo do tempo são possíveis:

- Tensão alternada: Para este tipo de ciclo, as tensões máximas (picos) e mínimas (vales) são iguais em magnitude, sendo as tensões de tração consideradas positivas, e as de compressão negativas.
- Tensão flutuante: Ciclo de tensão no qual as tensões máximas e mínimas são diferentes entre si, oscilando em torno de uma tensão média ( $\sigma_m$ ). Importante observar que este tipo de carregamento pode deslocar-se na direção dos eixos das coordenadas, estando totalmente no campo de tração ou compressão, ou ainda, com tensões máximas e mínimas com sinais opostos.
- Tensão aleatória: A variação de tensão ocorre de forma aleatória.

Figura 10 – Tipos de carregamento aplicado à fadiga.



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012, p. 219).

Observa-se na Figura 10, que a tensão média ( $\sigma_m$ ) pode ser definida como:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (1)$$

em que:

$\sigma_m$  é a tensão média;

$\sigma_{m\acute{i}n}$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  são as tensões máximas e mínimas respectivamente;

O intervalo de tensões, que é a faixa de variação das tensões aplicadas,  $\sigma_r$ , é definido como a diferença entre as tensões máxima e mínima:

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2)$$

A amplitude de tensão aplicada é definida como a metade do intervalo de tensões:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$



Outra importante variável é a chamada razão de variação das tensões, ou razão de carga,  $R$ , definida como:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{máx}} \quad (4)$$

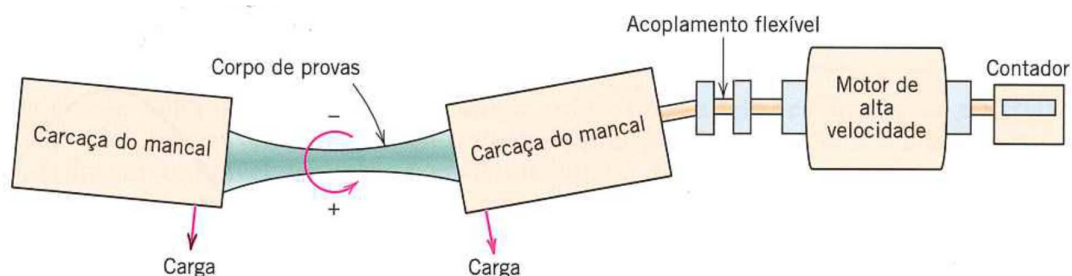
Ensaio mecânicos de fadiga, em que as tensões máximas e mínimas possuem valores iguais em módulo, ou seja, carga trativa e compressiva iguais, teremos  $R = -1$ , e a tensão média,  $\sigma_m$ , igual a zero. Esta condição é aplicada em grande parte dos ensaios deste tipo.

### 3.3.2 Curva de Wöhler ou curva S-N

Os ensaios mecânicos de fadiga consistem basicamente em submeter um corpo de prova à uma tensão ou deformação específica, registrando o número de ciclos até a falha. O ensaio mecânico mais comum é o de flexão rotativa, esquematizado na Figura 11, em que as tensões de tração e compressão são aplicadas ao corpo de prova conforme este é simultaneamente dobrado e girado. Apesar de ser simples e barato, a flexão rotativa possui limitações quanto as cargas aplicadas, pois considerando o fato de ser um ensaio rotativo, a razão de carga fica restrita a  $R = -1$ .

No caso de ensaios mecânicos onde a tensão média é diferente de zero, utiliza-se ensaio mecânico de flexão por três ou quatro pontos, ou axialmente em máquinas mais sofisticadas (MILAN *et al.*, 2014).

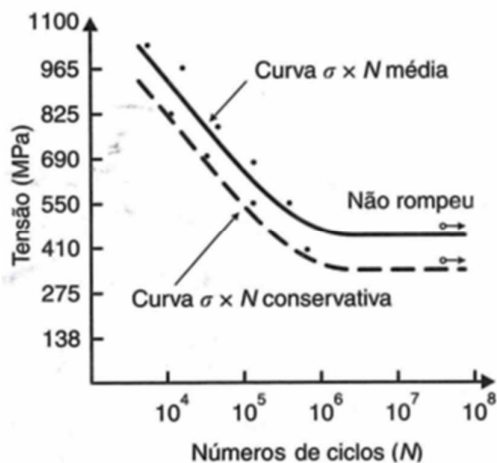
Figura 11 – Esquema de equipamento para ensaio de flexão rotativa.



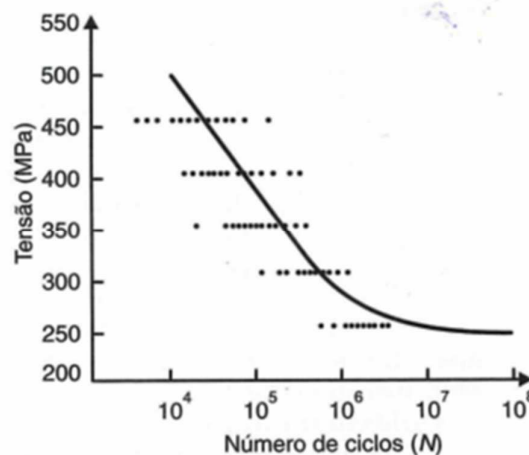
Os procedimentos mais comuns para realização dos ensaios para determinação da curva S-N são (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012):

- **Método padrão:** Usado normalmente quando se disponibiliza poucos corpos de prova. Esta estimativa consiste em submeter um ou dois corpos de prova a uma tensão abaixo de uma tensão mínima. Se a vida útil preestabelecida for atingida pelo primeiro corpo de prova, o próximo é ensaiado a uma tensão mais alta e assim sucessivamente. Os valores obtidos são plotados em um gráfico S-N padrão e ajustados por uma curva média mais conservativa (Figura 12a).
- **Método da tensão constante:** Neste método as tensões são selecionadas em valores espaçados, e vários corpos de prova são ensaiados sob esta tensão, obtendo-se uma nuvem de pontos para cada tensão. Com esses valores é traçada uma curva média que englobe todos os pontos (Figura 12b).

Figura 12 – Exemplos de curvas  $\sigma$ -N (S-N), determinadas pelos métodos padrão (a) e tensão constante (b).



(a)



(b)

Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012, p. 223).

Para algumas ligas ferrosas e de titânio, a curva S-N apresenta um patamar horizontal em valores elevados de N, indicando a existência de um nível de tensão limite, chamado de Limite de Resistência à Fadiga (LRF) (Figura 13a), ou seja, este limite significa o maior valor da tensão variável que não causará falha após, essencialmente um número infinito de ciclos. Para muitos aços, os limites de resistência à fadiga variam de 35% a 65% do limite de resistência à tração (LRT),

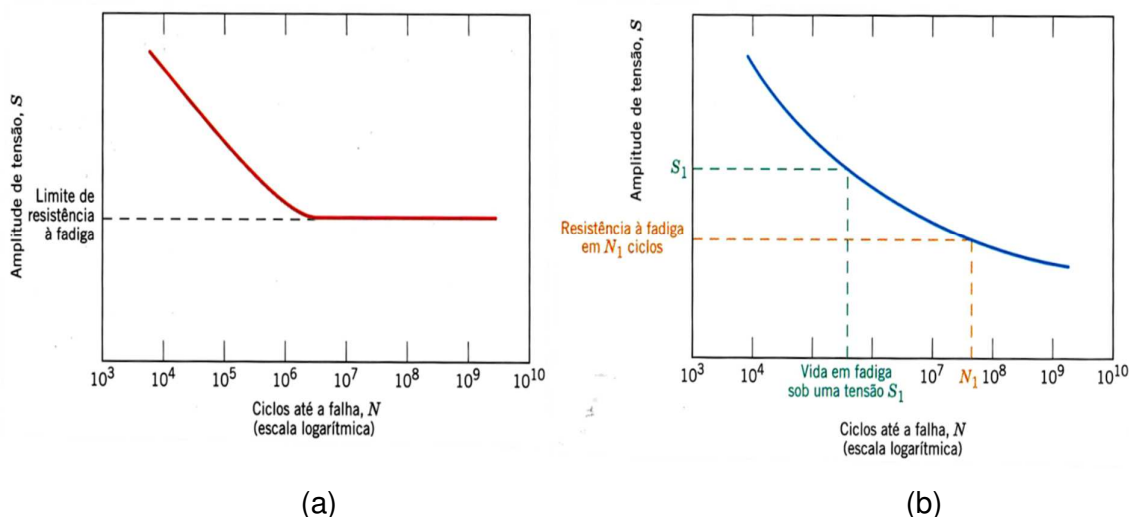
sendo considerada uma boa aproximação o valor de LRF, como 50% de LRT (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Para a maioria das ligas não-ferrosas não existe um limite de resistência definido, no sentido de que a curva S-N continua sua tendência decrescente nos maiores valores de  $N$  (Figura 13b). Isto significa dizer que ao final, ocorrerá uma fadiga independente da magnitude de tensão.

Para esses materiais, a resposta à fadiga é especificada como uma resistência à fadiga, definido como o nível de tensão ao qual a falha ocorrerá, para algum número de ciclos específico.

Outro parâmetro importante que caracteriza o comportamento à fadiga de um material é a chamada vida em fadiga,  $N_f$ . Este corresponde ao número de ciclos necessário para causar a falha sob um nível de tensão específico, conforme determinado na curva S-N (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2013).

Figura 13 – Amplitude de tensão ( $S$ ) em função do logaritmo do número de ciclos até a falha por fadiga ( $N$ ) para (a) um material que exhibe limite de resistência à fadiga e (b) um material que não exhibe este limite.



Fonte: Callister Jr e Rethwisch (2013, p. 221).

Em relação ao número de ciclos, os ensaios mecânicos de fadiga dividem-se em fadiga de baixo ciclo, quando a ruptura ocorre abaixo de  $10^4$  ciclos e fadiga de alto ciclo, para os casos acima deste valor. A Figura 13 apresenta gráficos para ambos os tipos de ciclos.

A fadiga de alto ciclo, também chamada HCF (*High Cycle Fatigue*), acontece com baixos níveis de tensão, estando relacionada às propriedades elásticas do material (resistência mecânica), já que as deformações aplicadas durante os ensaios mecânicos são predominantemente elásticas, enquanto que a fadiga de baixo ciclo, ou LCF (*Low Cycle Fatigue*), que ocorre com altos níveis de tensão, é caracterizada pela presença de deformação plástica cíclica acentuada, possibilitando determinações do comportamento dúctil do material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Analisando uma curva S-N, para o caso de materiais ferrosos observa-se uma tendência de aumento da vida útil do material com a diminuição da tensão cíclica aplicada, sendo que abaixo de determinado valor ela não é mais afetada. Essa tendência pode ser descrita pela equação de Basquin, que propôs em 1910 uma relação para testes de fadiga:

$$N = C S^n \quad (5)$$

em que:

$N$  é a vida útil do elemento (número de ciclos);

$C$  é a constante do material;

$S$  ou  $\sigma$  é a tensão cíclica aplicada ao material e;

$n$  é um expoente dependente do material;

No entanto, esta é uma abordagem simplista já que não considera fatores como o tempo necessário para nucleação da trinca, e outras variáveis como condição de superfície, carregamento, temperatura e concentradores de tensão (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

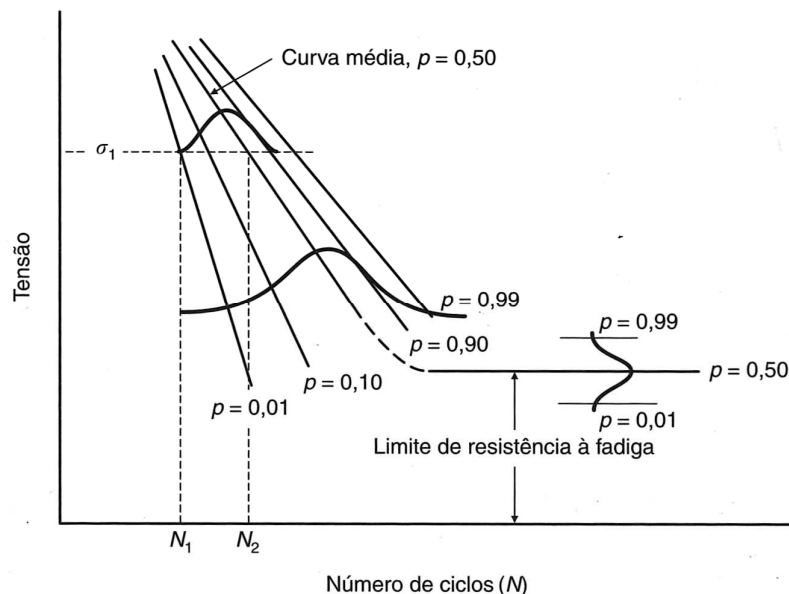
### 3.3.3 Resultados do ensaio de fadiga

Outra característica importante dos ensaios de fadiga é a grande dispersão dos resultados do número de ciclos ( $N$ ) entre corpos de prova submetidos a uma mesma tensão ( $S$ ), o que acaba gerando incertezas nos projetos onde o fenômeno de fadiga é relevante. Isto ocorre principalmente pelo fato de que o ensaio de fadiga é muito sensível a diversos parâmetros do ensaio e do material, que são difíceis de

controlar, como fabricação e preparo da superfície dos corpos de prova, variáveis metalúrgicas, alinhamento do corpo de prova no equipamento de testes, tensão média e a frequência de testes. Assim, dificilmente consegue-se extrair valores únicos do comportamento à fadiga de um determinado material para especificações de projeto. Com isso, faz-se necessário o uso de ferramentas estatísticas para uma determinação mais precisa da vida em fadiga ou da resistência à fadiga dos componentes mecânicos.

Uma maneira adequada de apresentar os resultados de fadiga consiste em adotar uma série de curvas de probabilidade constante, conforme mostrado na Figura 15. Observa-se que, para uma tensão cíclica de valor  $\sigma_1$ , 1% dos corpos de prova ensaiados sofrerão fratura para  $N_1$  ciclos de aplicação da tensão, e 50% dos corpos de prova de prova, para  $N_2$  ciclos. (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012)

Figura 14 – Apresentação dos resultados do ensaio de fadiga por meio de curvas de probabilidade constante.



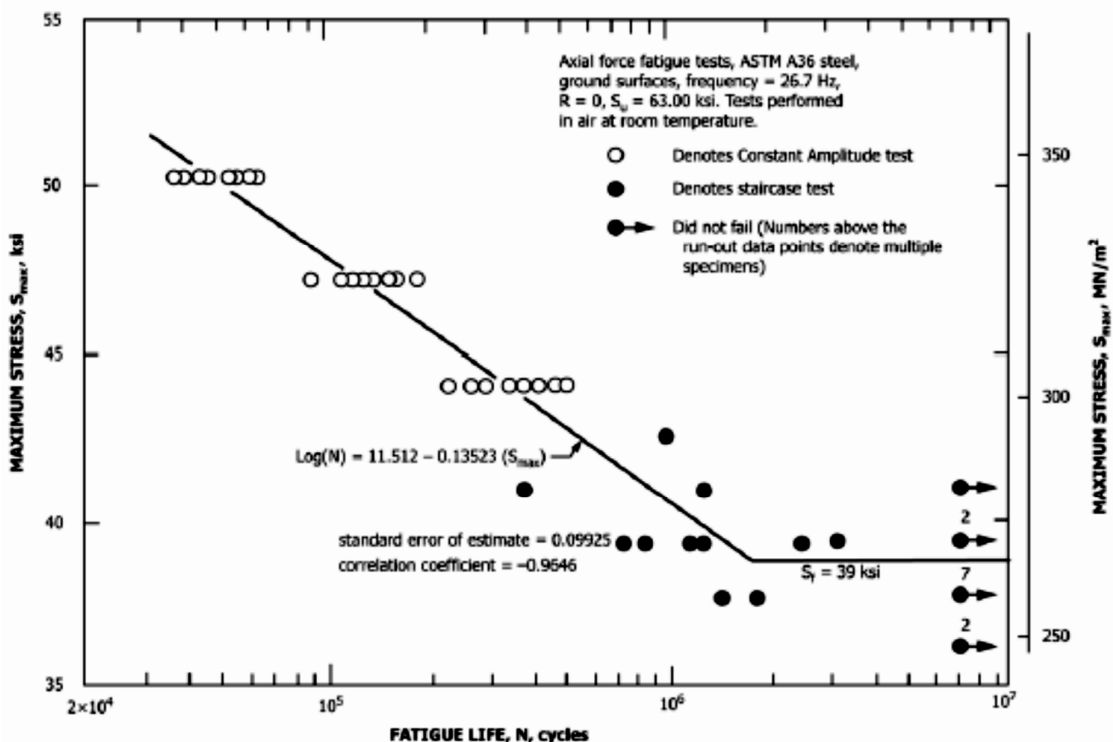
Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012, p. 226).

Um método também muito difundido no estudo de fadiga é o chamado método escada, que ao contrário dos anteriores, depende de uma quantidade menor de corpos de prova. Também chamado de *Staircase*, ou *Up-and-Down*, consiste basicamente em procurar por tentativas o valor do número de ciclos em que mais provavelmente vai ocorrer a fratura, obedecendo as seguintes etapas:

- Ensaia-se o corpo de prova a um valor de tensão próximo ao valor estimado da resistência à fadiga;
- Se o corpo de prova romper para  $N < 10^7$  ciclos, diminui-se a tensão aplicada de um valor fixo  $\Delta\sigma$ , que será o “degrau” da escada;
- O processo segue diminuindo-se a tensão até que o primeiro corpo de prova não rompa até  $N = 10$  milhões de ciclos;
- Após esse ponto, eleva-se novamente a tensão reduzida, geralmente  $\Delta\sigma/2$ , até se atingir uma ruptura do corpo de prova. Reverte-se novamente o procedimento até que todos os corpos de prova estejam ensaiados;
- Caso o primeiro corpo de prova atinja  $10^7$  ciclos, o processo se inverte, aumentando-se a tensão aplicada  $\Delta\sigma$ , e reduzindo em  $\Delta\sigma/2$  (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A Norma ASTM E468-18 (ASTM, 2018) que trata sobre a apresentação de resultados de teste de fadiga com amplitude constante, apresenta um exemplo de construção da curva S-N (Figura 15), utilizando níveis de tensão, e método *Staircase* para determinação da resistência média à fadiga. Na Figura 15, observa-se os três níveis de tensão, representados pelos círculos brancos, além dos círculos pretos distribuídos aleatoriamente, que indicam os corpos de prova utilizados pelo método *Staircase*, onde os que resistiram sem rupturas, estão representados com círculos pretos e setas.

Figura 15 – Exemplo de curva S-N com ensaios por nível de tensão e resistência média à fadiga pelo método *Staircase*.



Fonte: ASTM E468-18 (2018).

A metodologia empregada nessa dissertação seguirá a representação gráfica acima para baixos e altos ciclos. Na próxima seção, os avanços científicos de ensaios de fadiga axial para o aço AISI 316L obtido por manufatura aditiva, serão apresentados com a utilização de quadros, para indicar as informações qualitativas e quantitativas.

### 3.4 ESTUDOS DE FADIGA PARA O AÇO AISI 316L FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA

Uma revisão com a finalidade de obter informações qualitativas e quantitativas sobre estudos recentes publicados e relacionados a ensaios de fadiga em aço AISI 316L obtido por manufatura aditiva será apresentada nessa seção, com utilização de uma metodologia de pesquisa bibliográfica exposta a seguir.

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é uma metodologia de pesquisa bibliográfica sistemática com o objetivo de se efetuar uma pesquisa bibliográfica, que conforme os teóricos em metodologia, Marconi e Lakatos (2013, p. 57) busca “colocar

o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências”.

De acordo com Conforto, Amaral e Silva (2011), pesquisadores que realizaram um trabalho na área de engenharia, sugerem que a pesquisa bibliográfica se faça por um procedimento iterativo que contém 7 (sete) etapas, sumarizadas por: 1ª) busca por periódicos em base de dados; 2ª) filtro 1 – leitura do título, resumo e palavras-chave; 3ª) filtro 2 – leitura da introdução e das conclusões; 4ª) filtro 3 – leitura completa e seleção de artigos; 5ª) busca cruzada, ou seja, indicações nas referências do artigo ou reiniciando o ciclo de pesquisa; 6ª) busca por novos periódicos em outras bases de dados e aplicação das etapas 2 a 5, se necessário; 7ª) catalogação de artigos científicos. Ressalta-se que a aplicação da RSL se restringe às quatro primeiras etapas.

Nesse trabalho, a partir de 3 (três) conjuntos de palavras-chave (*strings* para busca em inglês) para o filtro “artigos” (excluindo artigos de revisão e outras formas), os quais abrangem os temas “316L”, “fadiga”, “tensão”, “aditiva”, “teste”, “manufatura”, “teste de fadiga”, “teste de tração” e “manufatura aditiva”; a biblioteca online Scopus foi selecionada como a base de dados para a realização da pesquisa bibliográfica (SCOPUS, 2022).

O Quadro 1 apresenta o quantitativo do total de documentos encontrados para os *strings* apresentados e propostos, o quantitativo de documentos disponíveis para download com acesso pela UFSC, e o quantitativo de documentos selecionados conforme a RSL.

Quadro 1 – Pesquisa bibliográfica na biblioteca online Scopus. O total para documentos selecionados desconsidera os documentos repetidos para os 3 conjuntos de palavras-chave.

Conjunto de Palavras-chave	Total de Documentos	Documentos Disponíveis	Documentos Selecionados*
1) “316L” AND “additive” AND “manufacturing” AND “fatigue” AND “tensile” AND “test”	16	15	11
2) “316L” AND “fatigue test” AND “tensile test”	15	13	2
3) “316L” AND “additive manufacturing” AND “fatigue test” AND “tensile test”	3	3	2
<b>Total</b>	<b>34</b>	<b>31</b>	<b>12</b>

Fonte: Autor.



Os resultados apresentados no Quadro 1 foram atualizados no período de 05 a 09 de dezembro de 2022. De um total de 34 (trinta e quatro) artigos científicos, um total de 15 (quinze) foram inicialmente selecionados para leitura, em que se constatou a duplicidade de 3 (três) documentos, sendo 12 (doze) artigos científicos efetivamente selecionados para a leitura por completo, bem como, a sumarização de informações (RSL) na forma de quadros.

O Quadro 2 apresenta os 6 (seis) Quesitos propostos e verificados em cada artigo científico selecionado, após aplicação das etapas 1<sup>a</sup> a 4<sup>a</sup>, de acordo com Conforto, Amaral e Silva (2011).

Quadro 2 – Quesitos propostos e verificados em cada artigo científico.

<b>Q1 – Qual método de deposição?</b>	Método de deposição utilizado na fabricação dos corpos-de-prova.
<b>Q2 – Qual o tipo do ensaio de fadiga?</b>	Forma de aplicação da carga. Ex. Rotativo, Axial, Flexão, etc...
<b>Q3 – Qual método de controle?</b>	Método de controle diz respeito à forma de carregamento a que os corpos de prova serão submetidos. Basicamente são duas as formas de controle: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Por carga: Define-se a carga ao qual o corpo de prova será submetido.</li> <li>• Por deformação: Define-se uma deformação ao qual o corpo de prova será submetido.</li> </ul>
<b>Q4 – Qual razão de carga (R)?</b>	Razão entre a carga mínima e a carga máxima aplicada ao corpo de prova. Ou seja: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
<b>Q5 – Qual o tratamento estatístico dos dados?</b>	Métodos estatísticos utilizados para obtenção dos resultados.
<b>Q6 – Quais os resultados obtidos?</b>	Forma de apresentação dos resultados. Ex. Curva S-N, Curva $\epsilon$ -N, Limite de resistência à fadiga, etc...

Fonte: Autor.

As informações qualitativas e quantitativas referentes as respostas das 6 (seis) questões apresentadas no Quadro 2, estão dispostas no Quadro 3 para os artigos científicos por ordem cronológica de publicação, totalizando 12 artigos científicos selecionados com a aplicação da RSL.

Quadro 3 – Informações qualitativas e quantitativas referentes as Questões do Quadro 2 para os artigos científicos selecionados.

(Continua)

	(SPIERINGS; STARR e WEGENER, 2013)	(SHRESTHA; SIMSIRIWONG e SHAMSAEI, 2019)	(ZHANG, <i>et al</i> , 2019)	(VOLOSKOV <i>et al</i> , 2020)	(AFKHAMI <i>et al.</i> , 2021)	(DUVAL- CHANEAC <i>et al.</i> , 2021)
Q1	SLM	L-PBF	L-PBF	L-PBF	L-PBF	L-PBF
Q2	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Flexão 3 pontos
Q3	Tensão	Deformação	Tensão	Tensão	Tensão	Tensão
Q4	0.1	-1	0.1	-1	0.1	-1
Q5	Linearização	Equação de Coffin-Manson	Não apresentado	Não apresentado	Goodman (R=-1)	Não Informado
Q6	Curva S-N	Curva $\epsilon$ -N	Curva S-N Previsão da Vida em fadiga	Curva S-N ( <i>Very High Cycle Fatigue</i> )	Curva S- N	Taxa de propagação de trinca

Quadro 3 – Informações qualitativas e quantitativas referentes as Questões do Quadro 2 para os artigos científicos selecionados.

(Continuação)

	(D'ANDREA <i>et al.</i> , 2022)	(PONTICELLI <i>et al.</i> , 2022)	(ROIRAND <i>et al.</i> , 2022)	(STERN, <i>et al.</i> , 2022)	(WEGENER <i>et al.</i> , 2022)	(ZENG; YANG e QIAN, 2022)
Q1	SLM	L-PBF	L-PBF	L-PBF	L-DED	SLM
Q2	Análise Termográfica	Flexão 3 pontos	Axial	Axial	Axial	Axial
Q3	Tensão	Tensão	Tensão	Tensão	Deformação	Tensão
Q4	-1 / 0,1	-1	-1	0.1	-1	0
Q5	Linearização	Linearização	Linearização	Linearização	Não apresentado	Weinbull
Q6	Curva S-N	Curva S-N	Curva S-N	Curva S-N	Tensão resultante de deformação Cíclica	Curva S-N Previsão da vida em fadiga.

Fonte: Autor.

A comparação de resultados, apesar de importante, torna-se difícil principalmente por causa das inúmeras variáveis que envolvem o ensaio de fadiga, como frequência de teste, razão de carga, modo de carregamento, dimensões de corpo de prova, dentre outras. Isto ficou evidenciado na análise dos artigos selecionados pela RSL, pois nenhum deles apresentou aderência em sua totalidade com as propostas deste estudo, que compreende as respostas dos quesitos para esta dissertação: Q1 - L-DED; Q2 – Axial; Q3 – Tensão; Q4 –  $R=-1$ ; Q5 – Linearização da curva S-N; Q6 – Obtenção da Curva S-N e LRF. Esse é o diferencial do presente trabalho.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Na seção materiais e métodos serão apresentados conceitos e características sobre o pó metálico que será usado na fabricação dos corpos de prova, assim como definições sobre o método de deposição à laser (L-DED). Também serão apresentadas informações sobre o corpo de prova a ser utilizado na realização dos ensaios. E por fim, conceitos sobre fadiga e o método *Staircase*, a ser utilizado na determinação do Limite de Resistência à Fadiga, LRF.

### 4.1 PÓ METÁLICO AISI 316L

Por definição, o termo pó tem um significado de um sólido granular que tenha tamanho de partícula abaixo de 1000  $\mu\text{m}$  (1 mm) (CHANG; ZHAO, 2013)

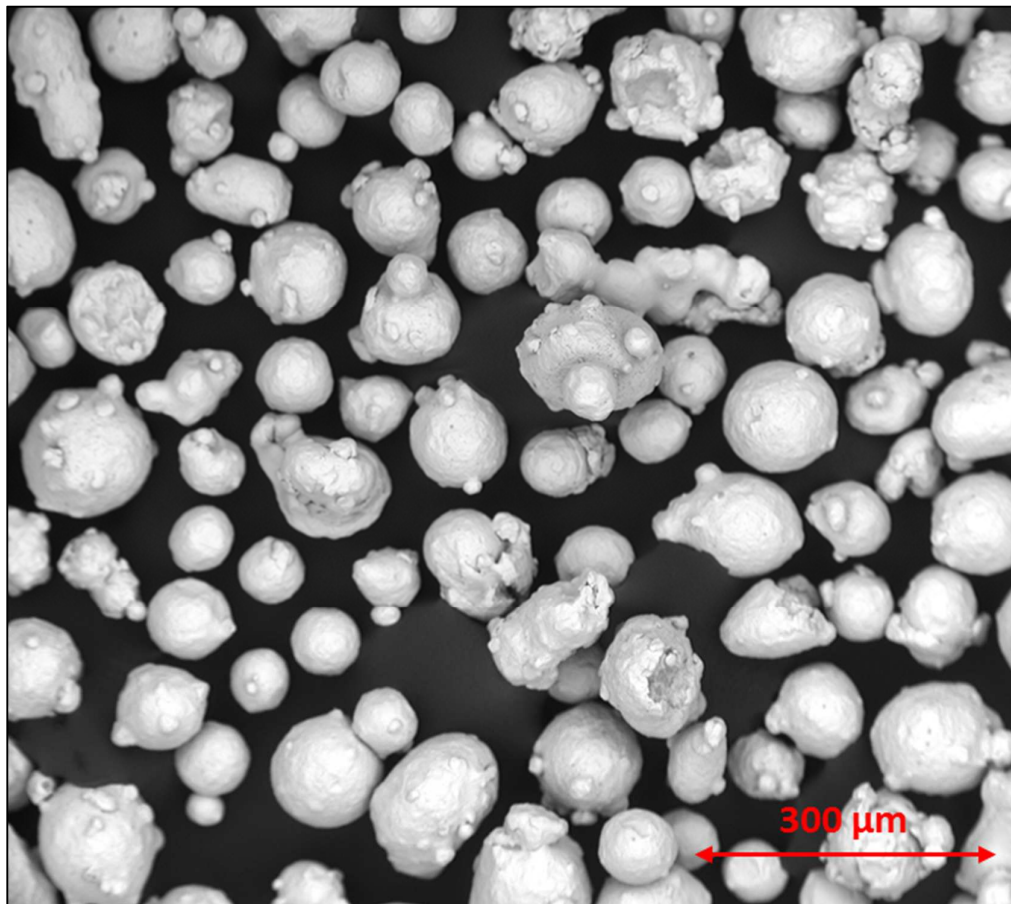
O pó metálico é utilizado há muito tempo em processos na área denominada “Metalurgia do Pó”. Os esforços nos desenvolvimentos destes processos, sobretudo no que tange a uma melhor compreensão da matéria-prima, são de grande utilidade para o desenvolvimento dos processos de manufatura aditiva de metais que utilizam como elemento de consolidação o pó metálico (THIESSEN JR, 2020).

No entanto, apesar da matéria-prima em forma de pó metálico ser bastante difundida e muito estudada nas últimas décadas, os requisitos da partícula metálica necessários para os processos de manufatura aditiva exigem um maior controle principalmente quanto ao tamanho das partículas, formato e composição química, sendo que estes requisitos dependem da configuração de cada processo.

O aço inoxidável 316L tem-se mostrado um material altamente compatível com o processo de manufatura aditiva por deposição a laser, sendo objeto de muitos estudos principalmente avaliando suas propriedades mecânicas, como visto na fundamentação teórica

Para a confecção dos corpos de prova deste estudo, foi utilizado o pó atomizado a gás, com granulometria entre 45 e 150  $\mu\text{m}$ , fabricante Hogãnas. A Figura 16 apresenta uma imagem de microscopia eletrônica de varredura do pó metálico AISI 316L usado neste estudo.

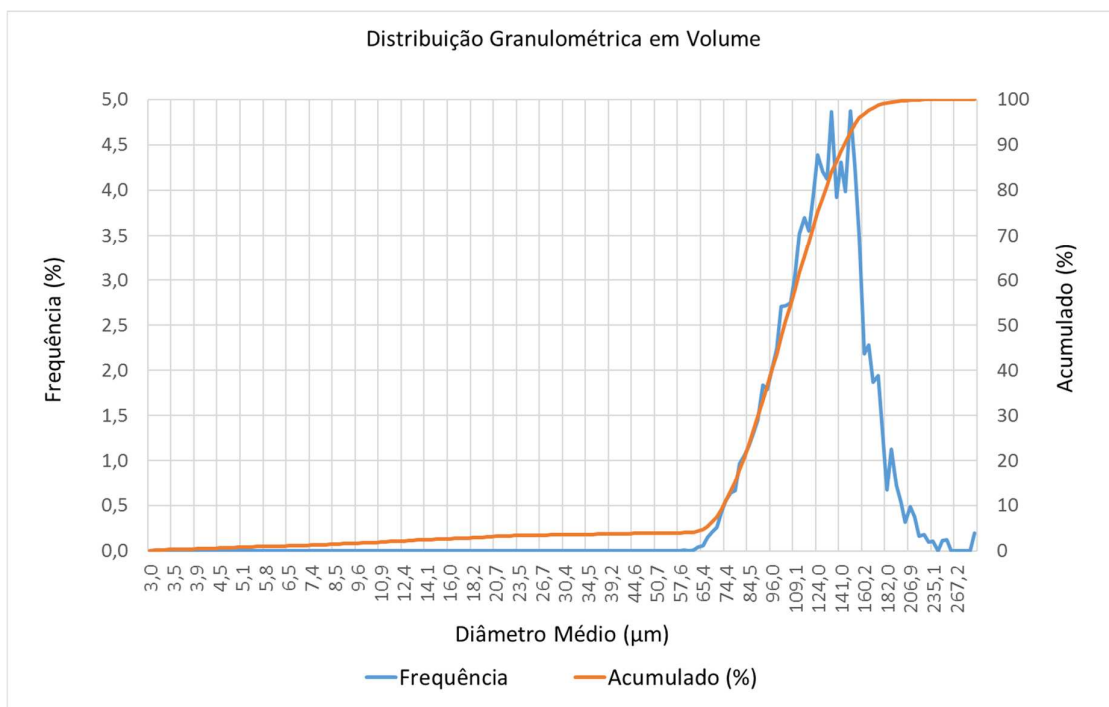
Figura 16 – Imagem do pó metálico AISI 316L, utilizado para confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

A distribuição granulométrica do pó utilizado foi determinada pelo método de análise dinâmica de imagem. A técnica consiste em avaliar a sombra gerada pelas partículas em suspensão ao passar em frente a uma fonte de luz (*shadowgraph*). O equipamento utilizado é o *Particle Insight Analyzer*. A Figura 17 apresenta o gráfico da frequência em função do diâmetro médio do pó metálico do aço AISI 316L. Observa-se que a maior frequência ocorre no intervalo de 125  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ . A Tabela 1 apresenta a contagem de partículas, a média, o desvio padrão e a moda.

Figura 17 – Distribuição granulométrica do pó metálico do aço AISI 316L.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Resultados no analisador de partícula *Particle Insight*.

Valores da Amostra		Distribuição Granulométrica	
Contagem (Partículas)	8.562	Percentis	Diâmetro (µm)
Média	105,6	10%	91,4
Desvio Padrão	31,9	50%	127,8
Moda	101,1	90%	167,2

Fonte: Autor.

As especificações para o aço inoxidável AISI 316L, são definidas pela Norma ASTM A182-21 (2021a). A Tabela 2, apresenta a especificação para a composição química, juntamente com os valores apresentados pelo certificado do fabricante, em que uma concordância é verificada entre os valores percentuais.

Tabela 2 – Composição química do pó utilizado no estudo.

Elemento	Composição Química (%)	
	ASTM A182-21 (ASTM, 2021a)	Certificado Fabricante
Ferro (Fe)	Balanço	Balanço
Carbono (C)	0,030 máx	0,019
Molibdênio (Mo)	2,00 – 3,00	2,50
Manganês (Mn)	2,00 máx	1,50
Fósforo (P)	0,045 máx	-
Silício (Si)	1,00 máx	0,70
Cromo (Cr)	16,00 – 18,00	16,90
Níquel (Ni)	10,00 – 15,00	12,70

Fonte: Autor.

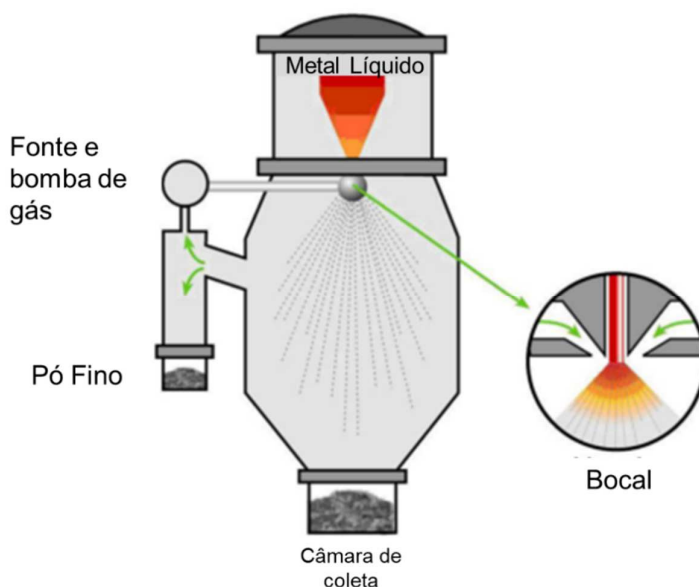
A maioria dos pós disponibilizados no mercado são obtidos pelo processo de atomização, sendo esta a técnica que tem se mostrado a mais adequada para produção de material particulado para os processos de manufatura aditiva metálica, principalmente pelas características geométricas das partículas obtidas.

A atomização é definida como um processo que, a partir de um metal no estado líquido, separa-o deste estado para o de pequenas partículas que sofrem um rápido processo de resfriamento, devido ao rápido contato com um jato de água, gás ou plasma (THIESSEN JR, 2020).

O processo de fusão do material (lingotes ou arames), pode ser exatamente o mesmo que o utilizado nos diferentes processos de atomização. No entanto, em materiais utilizados em aplicações de alta responsabilidade, como por exemplo aplicações aeroespaciais, médicas e Óleo e Gás, há uma preocupação especial quanto ao nível de elementos intersticiais, como Oxigênio (O), Nitrogênio (N) e Hidrogênio (H), devido ao prejuízo que tais elementos podem trazer ao comportamento mecânico da peça produzida. Nestes casos, opta-se pela utilização de um forno a vácuo de fusão por indução (*Vacuum Induction Melting-VIM*) para realizar a fusão do material antes do material líquido ser atingido pelo jato de gás (THIESSEN JR, 2020).

Para efeito de ilustração, a Figura 18 apresenta um desenho esquemático de uma configuração básica de um processo de atomização a gás, onde o metal líquido escoar por um bocal, encontrando com um jato de gás, que promove seu rápido resfriamento, formando assim as partículas que serão capturadas na câmara de coleta.

Figura 18 – Desenho esquemático de um atomizador a gás.



Fonte: Carpenter (2022).

A Figura 19 mostra os potes que contêm os pós metálicos do aço AISI 316L, utilizados no processo.

Figura 19 – Lote do pó metálico do aço AISI 316L, utilizado para a confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

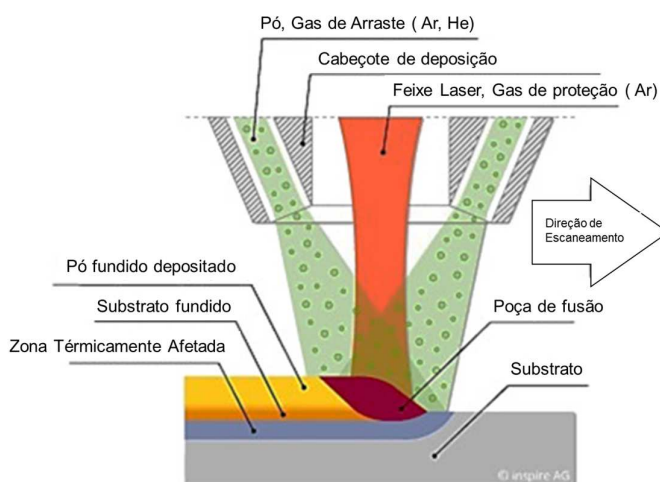


## 4.2 PROCESSO L-DED

Como já citado na fundamentação teórica, o processo L-DED, (*Laser - Direct Energy Deposition*), é um dos processos que compõe a manufatura aditiva.

O processo consiste basicamente em um feixe de pó metálico, o qual é direcionado até uma fonte de calor, no caso o laser, onde se funde, sendo então depositado camada a camada (NANKALI *et al.*, 2021).

Figura 20 – Esquema de processo de deposição direta a laser, L-DED.

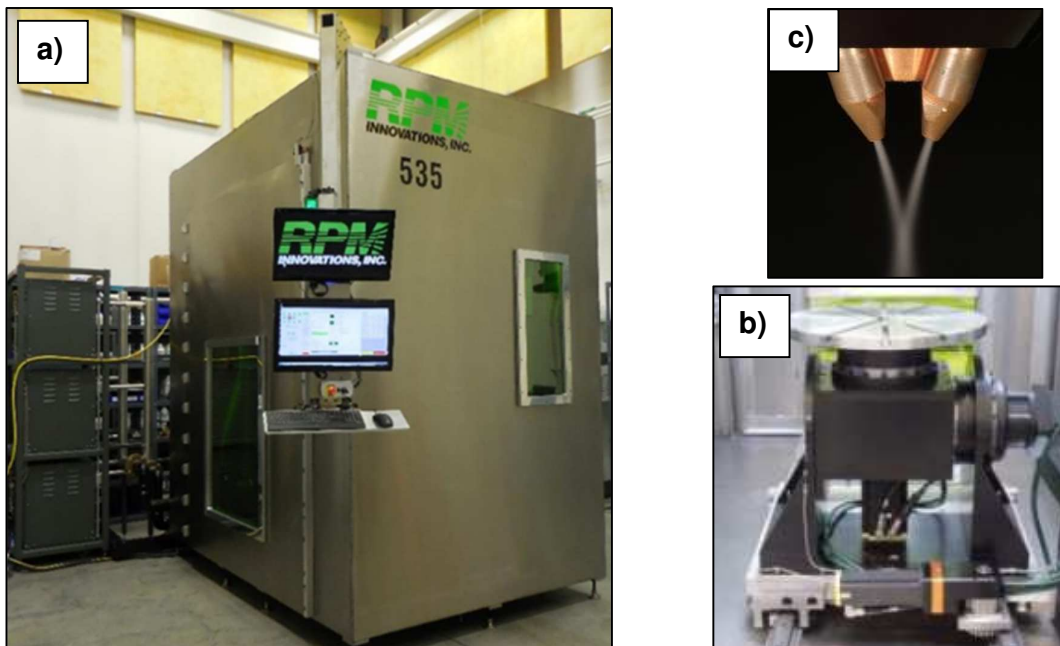


Fonte: Carpenter (2022).

O equipamento utilizado para as deposições e fabricações dos corpos de prova (Ver Figura 21), foi a RPMI 535®, da *RPMI Innovations* que tem como diferencial a possibilidade de fabricar peças em um ambiente com teores de oxigênio abaixo de 5 ppm.

A manutenção de teores de  $O_2$  tão baixos é devido à alta estanqueidade do equipamento e ao emprego de 2 filtros regeneradores de Argônio, que purificam o gás alimentado no equipamento de forma contínua, podendo levar os níveis de oxigênio a patamares inferiores à 0,2 ppm. O processamento das peças em atmosfera controlada desfavorece a formação de óxidos, minimizando o potencial de geração de defeitos durante a deposição e conferindo maior confiabilidade à peça fabricada (GUTJAHR, 2020).

Figura 21 – (a) Máquina de deposição a Laser modelo RPMI 535. Detalhe interno mostrando a mesa de deposição (b) e bicos do cabeçote de deposição (c).



Fonte: Autor.

### 4.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram depositados quatro conjuntos (*built*s), totalizando 32 corpos de prova de fadiga. Este número de corpos de prova garante que além dos previstos para a determinação da curva S-N e do limite de fadiga, haja corpos de prova sobressalentes caso ocorra algum erro no ensaio, ou resultados suspeitos possam ser substituídos, além de permitir ensaios em algum patamar de tensão não previsto inicialmente.

Os parâmetros de deposição utilizados, conforme Tabela 3, foram determinados por análises experimentais de deposições utilizando a mesma liga, avaliando as melhores condições no que diz respeito ao nível de porosidade e ocorrência de outros defeitos internos, conforme metodologia apresentada por Thiessen Jr (2020).

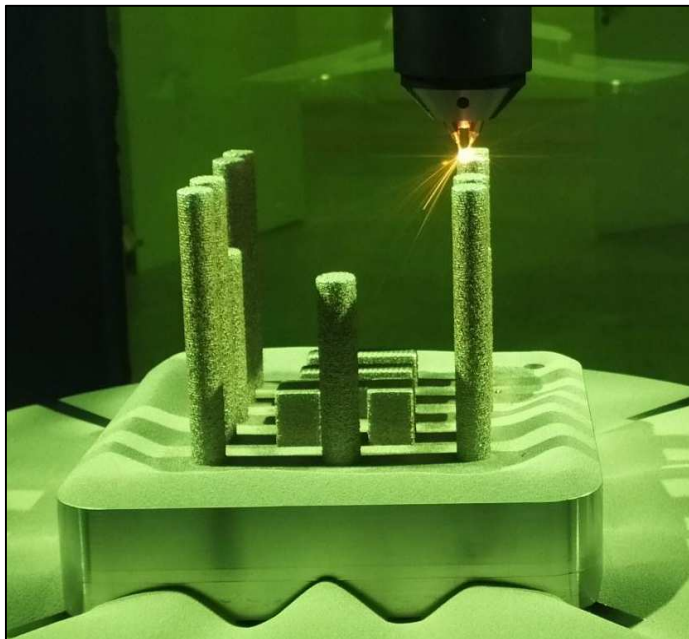
Tabela 3 – Parâmetros de deposição e fabricação dos corpos de prova.

Parâmetro	Unidade	Valor
Velocidade de deposição	mm / min	800
Potência do Laser	W	800
Vazão Mássica	g / min	13
Gás de Arraste	L / min	6
Gás Central	L / min	40
Concentração de O <sub>2</sub>	ppm	< 10

Fonte: Thiessen Jr (2020).

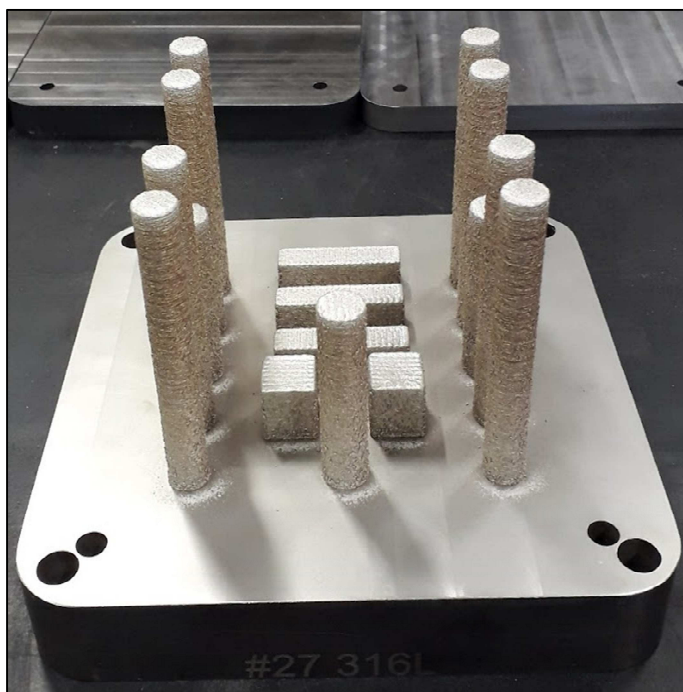
A Figura 22 mostra o processo de deposição, onde é possível ver os cilindros que serão usinados para obtenção dos corpos de prova. Já na Figura 23, o processo está finalizado estando os corpos de prova ainda dispostos sobre o substrato, onde serão finalmente levados ao equipamento de corte por eletroerosão a fio, conforme Figura 24.

Figura 22 – Deposição do *built* de fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Figura 23 – Substrato com todos os corpos de prova após deposição.



Fonte: Autor.

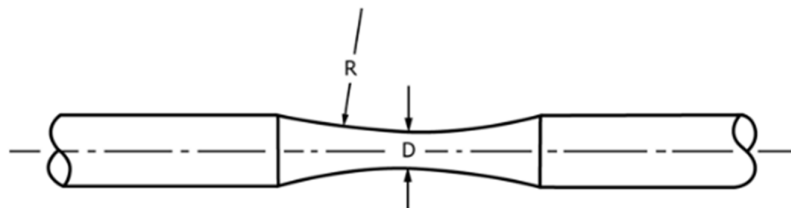
Figura 24 – Retirada dos corpos de prova do substrato pelo processo de eletroerosão a fio.



Fonte: Autor.

Após a retirada do substrato, os corpos de prova são peças cilíndricas com diâmetro de 14 mm e comprimento de 130 mm, conforme mostrado na Figura 26, onde seguem para usinagem de suas dimensões finais, seguindo recomendação da Norma ASTM E466-21 (2021b), conforme a Figura 25 e Tabela 4.

Figura 25 – Corpo de prova com raio contínuo para ensaio de fadiga, conforme Norma ASTM E466-21 (2021b).



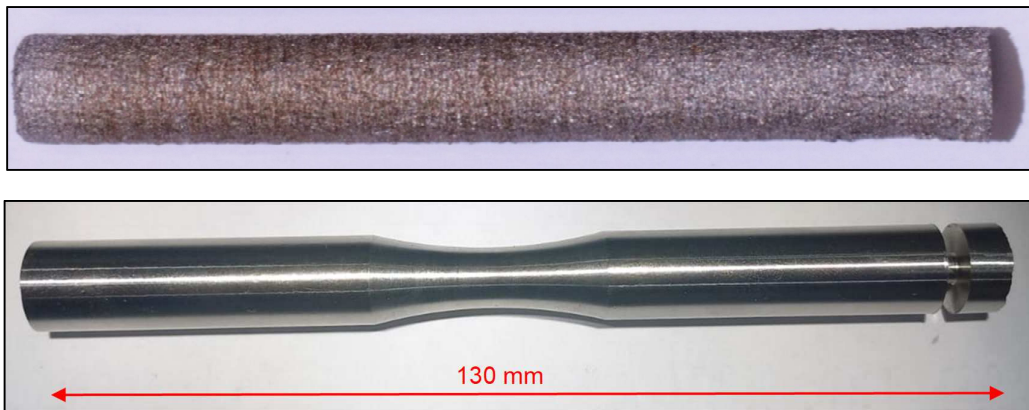
Fonte: ASTM E466-21 (2021b).

Tabela 4 – Dimensões adotadas para os corpos de prova.

Dimensão	Especificação ASTM E-466	Adotado
Diâmetro Nominal (D)	> 5,08 mm	8 mm
Raio Contínuo (R)	8 x D	64 mm
Diâmetro de fixação	Conforme fixação do equipamento	12 mm

Fonte: Autor.

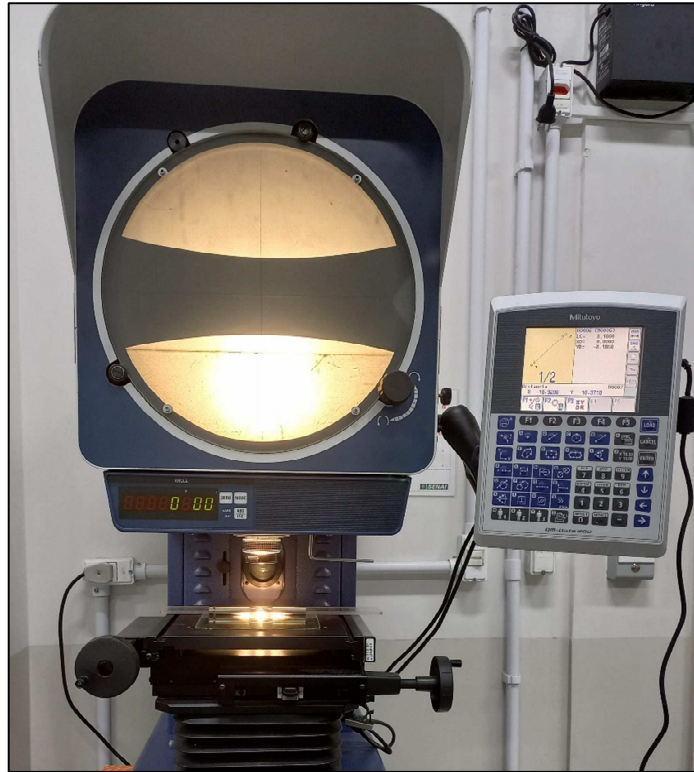
Figura 26 – Corpos de prova de fadiga na condição *as-built* e após usinagem final.



Fonte: Autor.

O diâmetro do corpo de prova de fadiga, após usinagem e polimento, foi medido no projetor de perfil MITUTOYO PJ-A3000, apresentado na Figura 27, evitando assim qualquer contato que possa danificar a superfície polida, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 27 – Projetor de perfil utilizado para medição do diâmetro final do corpo de prova de fadiga.



Fonte: Autor.

#### 4.4 ENSAIOS MECÂNICOS DE FADIGA AXIAL

Os ensaios mecânicos de fadiga axial (testes de fadiga) foram conduzidos conforme Norma ASTM E466-21 (2021b) em uma máquina servo-hidráulica de ensaios mecânicos, modelo INSTRON 8801 (Figura 28), com capacidade de carga de até 100 kN, monitorada com o programa INSTRON *WaveMatrix*, disponível no Laboratório de Caracterização Mecânica – LATECME, localizado nas dependências do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Laser – ISI/Laser.



Figura 28 – Equipamento de ensaios dinâmicos INSTRON modelo 8801.



Fonte: Autor.

Para o número de corpos de prova a serem ensaiados para a determinação da curva *S-N* (*Stress versus Number Cycles to Fail*), o manual técnico ASTM STP588-EB (ASTM, 1975), define que, tendo a curva *S-N* sua forma básica já definida, que é o caso para o aço inoxidável AISI 316L, cujo comportamento já é conhecido pela literatura, não é necessário a determinação da curva ponto-a-ponto, permitindo usar de quatro a seis níveis de tensão, aumentando o número de réplicas em cada tensão.

O manual também indica o número de corpos de prova, conforme o tipo de estudo a ser realizado, conforme informações do Quadro 4.

Quadro 4 – Indicação do percentual de replicação para cada tipo de estudo.

Tipo de Teste	% de Replicação
Pesquisas exploratórias e Testes de desenvolvimento.	17 a 33 min.
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	33 a 50 min.
Dados referenciais para projetos	50 a 75 min.
Dados de confiabilidade	57 a 88 min.

Fonte: Autor adaptado de ASTM STP588-EB (1975).



Conforme a quantidade de réplicas cresce, os níveis de tensão diminuem, o que permite encontrar a melhor condição, em função do tempo de teste ou o número de corpos de prova disponíveis.

O percentual de replicação é dado por:

$$\% \text{ de Replicação} = 100 \left[ \frac{\text{Total de níveis de tensão usados no teste}}{\text{Número de corpos de prova usados}} \right] \quad (6)$$

Considerando quatro níveis de tensão, sendo um deles o *Staircase*, e os resultados como “dados de confiabilidade”, conforme classificação do Quadro 5, substituindo o percentual mínimo indicado de 75% na Equação 6, teremos:

$$75 = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{4}{N} \right]$$

Ou seja:

$$N \cong 16 \text{ Corpos de Prova}$$

Repetindo para o máximo de 88% de replicação, teremos o número de corpos de prova definidos como:

$$88 = 100 \cdot \left[ 1 - \frac{4}{N} \right]$$

Ou seja:

$$N \cong 33 \text{ Corpos de Prova}$$

Com isso, podemos definir o número de corpos de prova indicado para o presente trabalho entre 16 e 33 corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 5 para os níveis de tensão.

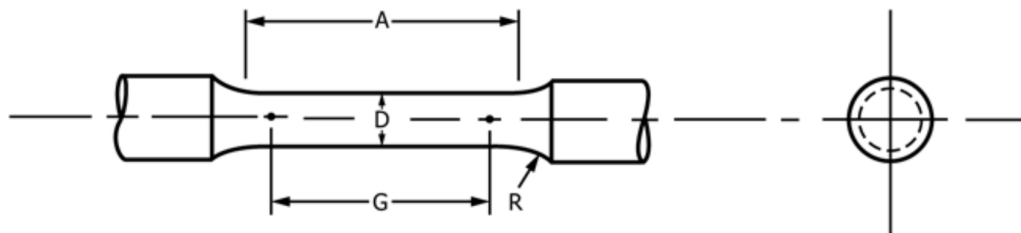
Tabela 5 – Níveis de tensão e número de corpos de prova.

Nível de Tensão	Tensão Aplicada [MPa]	Corpos de prova
S <sub>1</sub>	380	3
S <sub>2</sub>	360	3
S <sub>3</sub>	300	3
LRF	<i>S<sub>inicial</sub></i> = 244	15
<b>TOTAL</b>		<b>24</b>

Fonte: Autor.

Para entender previamente o comportamento mecânico do material do estudo, foram também realizados ensaios mecânicos de tração, segundo Norma ASTM E8/E8M-16 (ASTM, 2016), em alguns corpos de prova produzidos juntamente com os corpos de prova de fadiga, conforme as dimensões indicadas na Figura 30 e Tabela 6:

Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de tração estática.



Fonte: ASTM E8/E8M-16 (2016).

Tabela 6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração estática, conforme Norma ASTM E8/E8M-16 (2016).

Dimensão	Valor [mm]
<b>Diâmetro nominal (D)</b>	9,00
<b>Comprimento paralelo (A)</b>	45,00 (min)
<b>Raio de concordância (R)</b>	8,00 (min)
<b>Comprimento de medição (G)</b>	36,00 (min)
<b>Diâmetro de fixação</b>	Rosca M12

Fonte: Autor.

#### 4.4.1 Método *Staircase* ou *Up-and-Down*

Para a determinação da chamada Resistência Média à Fadiga (ou Limite de Resistência à Fadiga, LRF) definida como a tensão limite para que o material resiste a 10 milhões de ciclos, foi utilizada a metodologia *Up-and-Down* ou *Staircase*, já inicialmente citada na seção 3.3.3.

O método (Figura 30) basicamente consiste em, após a primeira tensão ao qual o corpo de prova resista a 10 milhões de ciclos, ou apresente ruptura, esta tensão receba incremento ou decréscimo, até que sejam testados todos os quinze corpos de prova selecionados, o que garante o atingimento do fator de convergência ideal, permitindo assim a determinação da resistência média à fadiga e o desvio padrão deste valor, onde para isto utilizam-se as seguintes expressões:

Fator de Convergência (C):

$$C = \frac{n \sum i^2 N_i - (\sum i N_i)^2}{n^2} \quad (7)$$

sendo:  $C \geq 0,30$ , para um desvio padrão válido;

Limite de Resistência à Fadiga (LRF):

$$\text{LRF} = \sigma_0 + d \cdot \left[ \frac{\sum i N_i}{n} + b \right] \quad (8)$$

Desvio Padrão ( $D_p$ ):

$$D_p = 1,62 \cdot d \cdot (C + 0,029) \quad (9)$$

Onde:

$\sigma_0$  = Menor nível de tensão;

$d$  = Passo de incremento/decrécimo na tensão anterior;

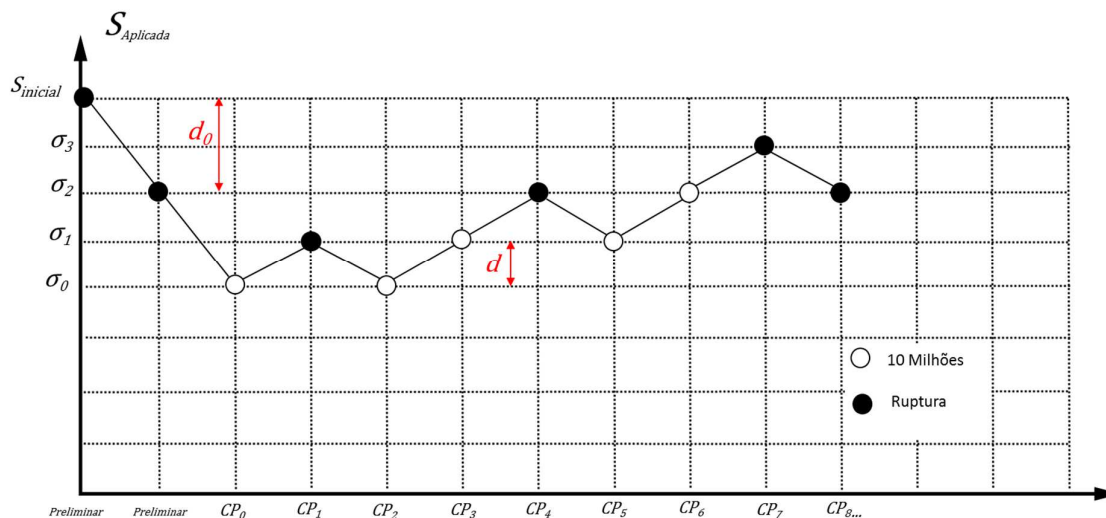
$N_i$  = Número de falhas ou 10 milhões, sendo a menor ocorrência, para cada nível;

$i$  = 0 para menor tensão, 1 para o próximo e assim sucessivamente;

$n$  = Número total de falhas ou 10 milhões, sendo a menor ocorrência;

$b$  =  $\frac{1}{2}$  para 10 milhões, e  $-\frac{1}{2}$  para falhas, e

$C$  = Fator de convergência.

Figura 30– Representação gráfica da metodologia *Staircase*.

Fonte: Autor.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados no *Staircase*. Estes parâmetros foram definidos levando-se em consideração os resultados do ensaio estático, principalmente o limite de resistência à tração, LRT, já que dados de fadiga para este material, nesta condição de fabricação não foram encontrados.

Tabela 7 – Parâmetros método *Up-and-Down*.

Parâmetro	Valor adotado
Tensão Inicial, $\sigma_{inicial}$ (MPa)	244 MPa
Passo Incremental Inicial, $d_0$ (MPa)	31 MPa ( $\approx 5\%$ LRT)
Passo Incremental, $d$ (MPa)	15 MPa ( $\approx 2,5\%$ LRT)

Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Análise de dados e tratamento estatístico

A análise dos dados se dará pela representação gráfica e tabular, e o tratamento estatístico compreende o cálculo da média, do desvio padrão, do fator de convergência e da regressão linear.

#### 4.4.3 Fractografia

Como uma análise complementar, serão avaliadas algumas fraturas selecionadas dentre as consideradas mais relevantes, com o objetivo de identificar o início da trinca de fadiga, bem como o comportamento de propagação.

Para esta avaliação será utilizado o microscópio eletrônico com tecnologia FEG (Figura 31) do fabricante Zeiss, modelo SUPRA 55 VP, disponível no LATECME, localizado nas instalações do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Laser – ISI/Laser, que permite o aumento de imagens em magnitudes de até 1 milhão de vezes por meio de elétrons secundários.

Figura 31 – FEG utilizado para a microscopia eletrônica.



Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para os ensaios mecânicos de tração para definição dos níveis de tensão no ensaio mecânico de fadiga, assim como a análise de dados dos resultados de ensaios mecânicos de fadiga por tração-compressão axial, serão apresentados e discutidos.

### 5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS POR TRAÇÃO UNIAXIAL

Para entender melhor o comportamento mecânico do material, foram realizados ensaios mecânicos tração, segundo Norma ASTM E8/E8M-16 (ASTM, 2016), sendo os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados de ensaios de tração quase-estáticos.

Corpo de prova	Limite de Resistência à Tração [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]
1	606	390	47
2	615	401	48
3	607	398	44
4	615	402	44
5	609	394	50
6	607	392	44
<b>Média</b>	<b>610</b>	<b>396</b>	<b>46</b>
<b>Desvio Padrão</b>	4,1	4,9	2,6

Fonte: Autor.

O LRT, determinado pelos ensaios mecânicos, serve como referência para determinação dos níveis de tensão a serem utilizados para os ensaios mecânicos de fadiga, conforme Tabela 9. Porém, abaixo da tensão 244 MPa, as tensões passaram a seguir os passos definidos para o *Staircase* conforme Tabela 7.

Tabela 9 – Percentual dos níveis de tensão em relação ao LRT.

Tensão Máxima [MPa]	% LRT
380	62
360	59
320	52
300	49
244	40

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos estão coerentes com alguns encontrados na literatura quanto ao LRT, LE e Alongamento para o aço AISI 316L, processados por manufatura aditiva, no sentido vertical de deposição, que é o mesmo sentido utilizado nos corpos de prova deste trabalho conforme apresentado na Tabela 10. Porém, vale salientar que estes resultados se referem a corpos de prova foram processados pelo método L-PBF.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do aço AISI 316L processado por manufatura aditiva, segundo alguns autores.

Referência	LE [MPa]	LRT [MPa]	Alongamento [%]
Riemer <i>et al.</i> (2014)	462	565	50
Casati; Lemke; Vedani (2016)	554	580	26
Deev; Kusnetkov; Petrov; (2016)	419 - 486	482 - 581	9 - 18
Suryawanshi; Prashanth; Ramamurty (2017)	430 - 448	509 - 527	12
Liverani <i>et al.</i> (2017)	430 - 489	547 - 572	40 - 70
Borges (2020)	522 - 542	663 - 684	26 - 48
ASTM A240-22A (ASTM, 2022)	170	485	40 - 45

Fonte: Autor.

## 5.2 DADOS OBTIDOS COM TESTES DE FADIGA AXIAL

Nesta seção apresentaremos todos os resultados obtidos nos ensaios mecânicos de fadiga, incluindo os ensaios de níveis de tensão, e também os utilizados para o *Staircase*.

Tabela 11 – Resultados brutos obtidos nos ensaios de fadiga.

CP	Diâmetro [mm]	Área [mm <sup>2</sup> ]	Carga [N]	Freq. [Hz]	Tempo	Tensão, S [MPa]	Ciclos
1	8,123	51,823	19.692,75	3	0h20min10s	380	3.630
2	8,189	52,669	20.014,06	3	0h17min00s	380	3.059
3	8,166	52,373	19.901,79	3	0h15min21s	380	2.762
4	8,188	52,656	18.956,06	3	0h36min03s	360	6.490
5	8,160	52,296	18.826,63	3	0h47min:55s	360	8.625
6	8,150	52,168	18.780,52	3	0h34min08s	360	6.145
7	8,149	52,155	16.689,70	3	4h24min22s	320	47.585
8	8,142	52,066	16.661,04	3	6h41min04s	320	72.193
9	8,252	53,482	17.114,27	3	4h44min24s	320	51.193
10	8,149	52,155	15.646,59	3	13h57min16s	300	150.707
11	8,178	52,527	15.758,15	3	13h01min11s	300	140.614
12	8,156	52,245	15.673,48	3	16h38min17s	300	179.690
13	8,148	52,143	12.722,77	3	41h16min45s	244	445.815
14	8,177	52,514	12.813,50	3	70h29min20s	244	761.280
15	8,194	52,733	11.232,11	30	6h22min14s	213	688.011
16	8,152	52,194	10.282,16	30	23h31min03s	197	2.539.886
17	8,14	52,117	9.485,28	30	10h22min29s	182	1.120.463
18	8,170	52,424	9.541,25	30	12h28min50s	182	1.347.901
19	8,124	51,836	9.434,11	30	92h35min33s	182	10.000.000
20	8,128	51,887	9.443,41	30	92h35min33s	182	10.000.000
21	8,100	51,530	9.378,46	30	44h59min30s	182	4.859.112
22	8,154	52,219	8.720,63	30	92h35min33s	167	10.000.000
23	8,143	52,079	8.697,12	30	92h35min33s	167	10.000.000
24	8,128	51,887	8.665,10	30	92h35min33s	167	10.000.000
25	8,190	52,681	8.797,80	30	12h35min17s	167	1.359.519
26	8,165	52,360	7.958,77	30	92h35min33s	152	10.000.000
27	8,184	52,604	7.995,85	30	92h35min33s	152	10.000.000
28	8,151	52,181	7.931,50	30	92h35min33s	152	10.000.000
29	8,148	52,143	6.361,39	30	92h35min33s	122	10.000.000

Fonte: Autor.



Dos 32 corpos de prova disponíveis, dois foram perdidos durante o *setup* para o ensaio de fadiga, e um durante a usinagem. Por isso o número de 29 corpos de prova.

As Tabelas 12 e 13, apresentam alguns dados estatísticos obtidos para os ensaios executados com frequência de 3 Hz e 30 Hz, respectivamente.

Tabela 12 – Análise estatística dos resultados de fadiga, frequência de 3 Hz, para n=14.

Variáveis	Unidade	Média	Desvio Padrão	Min.	Máx.
S	MPa	326,29	46,24255	244	380
N	---	134.271	216.786	2.762	76.1280
D	mm	8,166	0,031	8,123	8,252
A	mm <sup>2</sup>	52,377	0,397	51,823	53,482
F	N	17.089,38	2.420,37	12.722,77	20.014,06
Tempo Decimal	h	12,43	20,07	0,26	70,49

Fonte: Autor.

Tabela 13 – Análise estatística dos resultados de fadiga, frequência de 30 Hz, para n=15.

Variáveis	Unidade	Média	Desvio Padrão	Min.	Máx.
S	MPa	171,07	21,70	122,00	213,00
N	---	6.794.330	4.166.300	688.011	10.000.000
D	mm	8,152	0,026	8,100	8,194
A	mm <sup>2</sup>	52,192	0,333	51,530	52,733
F	N	8.928,33	1.137,83	6.361,39	11.232,11
Tempo Decimal	h	62,91	38,58	6,37	92,59

Fonte: Autor.

Observa-se que as maiores tensões, aplicadas com 3 Hz de frequência, apresentam um número baixo de ciclos (Tabela 12), enquanto tensões menores (Tabela 13), aumentam consideravelmente a média de ciclos, e com isso o tempo médio de ensaio, apesar de serem executados à uma tensão de 30 Hz. O diâmetro,

assim como a área dos corpos de prova, apresenta médias muito próximas, já que a geometria dos corpos de prova é a mesma (Figura 26).

### 5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO STAIRCASE AOS TESTES DE FADIGA AXIAL

Nesta seção serão apresentados os resultados para Limite de Resistência à Fadiga (LRF), com o desvio padrão, utilizando a metodologia *Staircase*, já abordada na seção 4.4.1.

A Tabela 14 apresenta os corpos de prova que foram utilizados para a determinação do Limite de Resistência à Fadiga (LRF), pelo método *Staircase*.

Vale a pena ressaltar que para esta metodologia, o número de ciclos não é relevante, sendo mais importante o número de corpos de prova que romperam ou resistiram à 10 milhões de ciclos (Ver Equações 7,8 e 9).

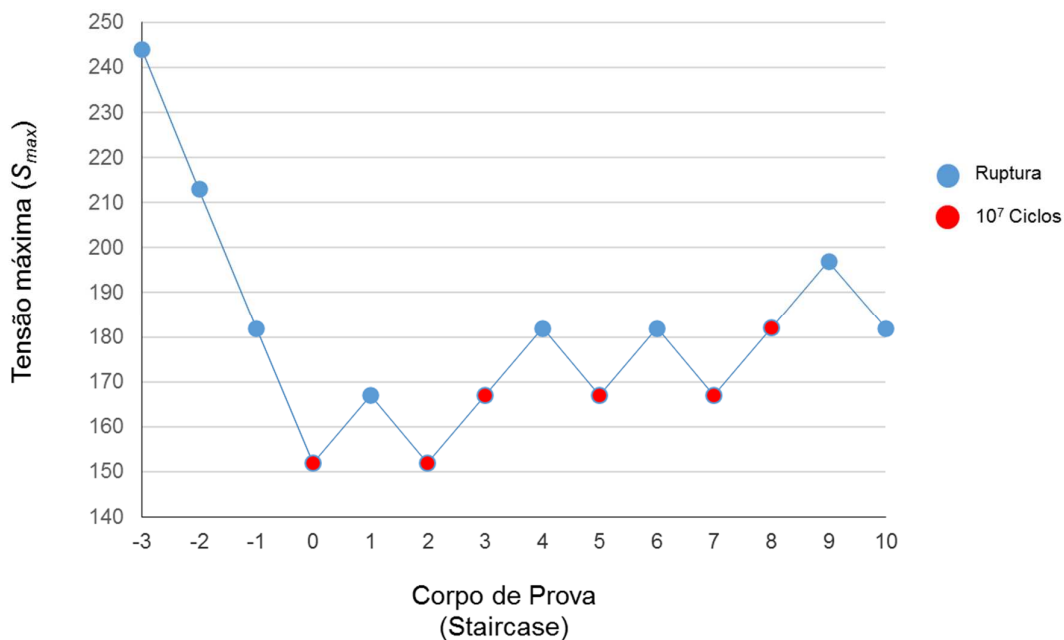
Tabela 14 – Resultados obtidos para metodologia *Staircase*.

Corpo-de-Prova ( <i>Staircase</i> )	Tensão (% LRT)	Tensão (MPa)	N Ciclos Falha	Stress Level
-3	40,0	244	445.815	Preliminar
-2	35,0	213	688.011	Preliminar
-1	30,0	182	4.859.112	Preliminar
0	25,0	152	10.000.000	0
1	27,5	167	1.359.519	1
2	25,0	152	10.000.000	0
3	27,5	167	10.000.000	1
4	30,0	182	1.347.901	2
5	27,5	167	10.000.000	1
6	30,0	182	1.120.463	2
7	27,5	167	10.000.000	1
8	30,0	182	10.000.000	2
9	32,5	197	2.539.886	3
10	30,0	182	10.000.000	2

Fonte: Autor.

A Figura 35 mostra a representação gráfica dos resultados obtidos para o *Staircase*, onde os três primeiros corpos de prova, chamados de preliminares, romperam, sendo que o primeiro corpo de prova a resistir foi sob a tensão de 152 MPa, considerado então o nível inicial do *Staircase*.

Figura 32 – Representação gráfica dos resultados obtidos pelo método *Staircase*.



Fonte: Autor.

Tabela 15 – Ocorrência de rupturas ou 10 milhões de ciclos.

Tensão (S) [MPa]	Ruptura	10 Milhões
244	1	0
213	1	0
182	3	1
167	1	3
152	0	2
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Fonte: Autor.

Para o *Staircase*, deve-se considerar a menor ocorrência. Neste caso, como as ocorrências foram iguais, optou-se pela ocorrência de 10 milhões em função de um desvio padrão menor. O método foi finalizado após todos os corpos de prova terem sido submetidos ao teste.

Tabela 16 – Varáveis utilizadas para determinação do LRF.

Tensão, S	$i$	$N_i$	$iN_i$	$i^2N_i$
182	2	2	4	8
167	1	3	3	3
152	0	2	0	0
10 milhões $\Sigma$		7	7	11

Fonte: Autor.

Os valores da tabela 16 são substituídos na Equação 7, e assim a verificação do fator de convergência (C) pode ser realizada, a seguir:

$$C = \frac{n \sum i^2 N_i - (\sum iN_i)^2}{n^2} = \frac{7 \cdot 11 - (7)^2}{7^2} = 0,57$$

Sabendo que  $C > 0,30$ , para termos um desvio padrão válido, usando a Equação 9 temos o desvio padrão definido como:

$$D_p = 1,62 \cdot d \cdot (C + 0,029) = 1,62 \cdot 15 \cdot (0,57 + 0,029) = 14,56$$

E finalmente para determinação do Limite de Resistência à Fadiga (LRF) usamos a Equação 8, sendo:

$$\text{LRF} = S_0 + d \cdot \left[ \frac{\sum iN_i}{n} + b \right] = 152 + 15 \cdot \left[ \frac{7}{7} + 0,5 \right] = 174,50$$

Ou seja, pelo método *Staircase* o Limite de Resistência à Fadiga, é definido:

$$\text{LRF} = 174,50 \pm 14,56 \text{ MPa}$$

Este resultado é aproximadamente igual à 29% do LRT, apresentado na Tabela 9, estando um pouco abaixo do que Garcia, Spim e Santos (2012) relata para a maioria dos aços, que é 35% à 65%.

Spierings, Starr e Wegener (2013) em estudo avaliando o comportamento em fadiga do aço inoxidável 316L, produzidos pelo método SLM, com ensaios conduzidos com razão de carga de  $R = 0,1$ , obteve um limite de fadiga de 255 MPa, sendo este valor equivalente à 34% da tensão máxima de ruptura do material, dada como 760 MPa, assim como uma estimativa do limite de resistência à fadiga, utilizando o diagrama de Smith, com razão de carga de  $R = -1$ , onde obteve um resultado de limite de resistência a fadiga de 172 MPa, próximo ao obtido neste estudo.

Afkhami *et al.* (2021), apresentaram resultados de testes de fadiga de alto ciclo, considerando como resistentes amostras com  $1,1 \times 10^6$ , utilizando a razão de carga  $R = 0,1$ , em corpos de prova de aço inoxidável AISI 316L, obtendo uma resistência média à fadiga de 207 MPa, para os corpos de prova depositados na direção vertical e usinados

Em um estudo sobre materiais para biomedicina, Teoh (2000), apresentou o limite de resistência à fadiga para o aço AISI 316L fundido o valor de 225 MPa, e para forjado 350 MPa, sem relacionar com o Limite de Resistência à Tração, LRT.

#### 5.4 FRACTOGRAFIAS

Com o objetivo de avaliar o comportamento da fratura dos corpos de prova, haja visto que dos 29 corpos de prova testados, aproximadamente 79% romperam e outros 21% atingiram 10 milhões de ciclos, foram selecionadas duas amostras: uma delas com ruptura abaixo de 1.000.000 de ciclos e outra acima. Isto porque notadamente as amostras que apresentaram ruptura abaixo de 1 milhão, apresentaram uma fratura aparentemente com maior percentual dúctil, em função da alta carga aplicada. Já as amostras acima deste valor, mostraram fratura com aparência mais frágil, sem grandes deformações. As fraturas foram separadas do

corpo de prova, para que fossem inseridas na câmara do equipamento, e colocadas no limpador ultrassônico mergulhadas em acetona, por 6 minutos.

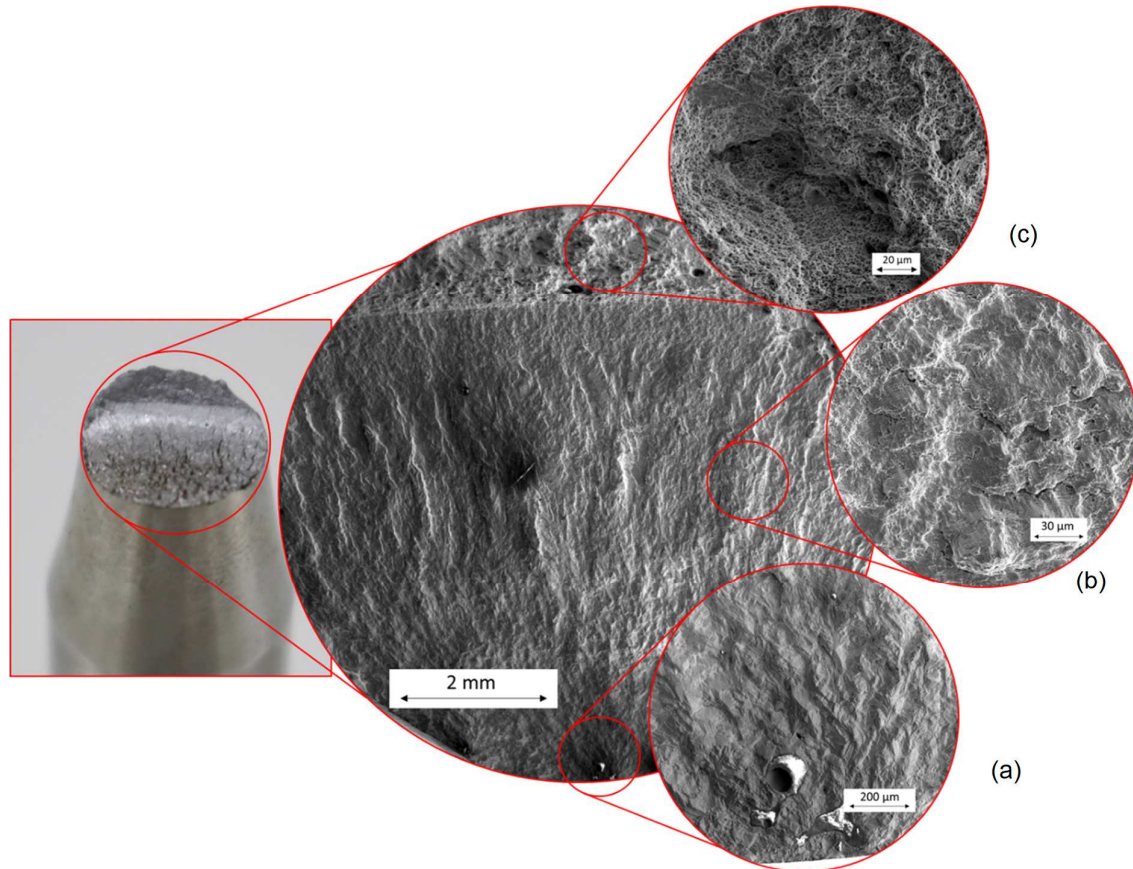
A amostra com ruptura abaixo de 1 milhão de ciclos, com identificação CP 6, foi submetida a uma tensão de 360 MPa, rompendo com 6.145 ciclos. Já a amostra com ruptura acima, com identificação CP 18, foi submetida a uma tensão de 182 MPa, rompendo com 1.347.901 ciclos.

As trincas de fadiga em materiais metálicos, apresentam 3 regiões bem características:

- **Região de nucleação:** Ponto inicial da trinca, geralmente caracterizado por uma região de alta concentração de tensão ou baixa resistência mecânica como defeitos superficiais, acabamento ruim, ângulos retos ou entalhes mau projetados, assim como inclusões, contornos de grão, porosidades acentuadas podem ser fatores determinantes para a nucleação da trinca;
- **Região de propagação estável:** O esforço cíclico imposto provoca deformações plásticas na ponta da trinca. Em resposta à estas deformações, a ponta da trinca torna-se curva, durante a tração. Quando esta tensão de tração cessa, ou passa a ser compressiva, a ponta da trinca novamente torna-se aguda, reiniciando o processo para cada ciclo de tensão, provocando um avanço estável da trinca. Este fenômeno provoca na fratura marcas características, chamadas de estrias de fadiga, sendo observáveis somente em microscopia eletrônica, e que caracterizam a região de propagação estável;
- **Região de propagação instável:** Com o avanço da trinca, a área resistente torna-se cada vez menor, até atingir um ponto onde a tensão supera a resistência mecânica do material, apresentando uma ruptura repentina, também chamada de ruptura catastrófica (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

As duas amostras analisadas apresentaram a nucleação da trinca em defeitos subsuperficiais, Figura 31(a) e Figura 32(a). A presença de alguns defeitos visíveis na região de propagação estável não favoreceu a nucleação interna da trinca.

Figura 33 – Fractografia da amostra CP 18, que foi submetido a uma tensão de 182 MPa. (a) Defeito aparente no ponto de nucleação da trinca, (b) Região de propagação estável com a presença de estrias de fadiga, (c) Ruptura catastrófica, com a presença de *dimples* característicos de fraturas dúcteis.

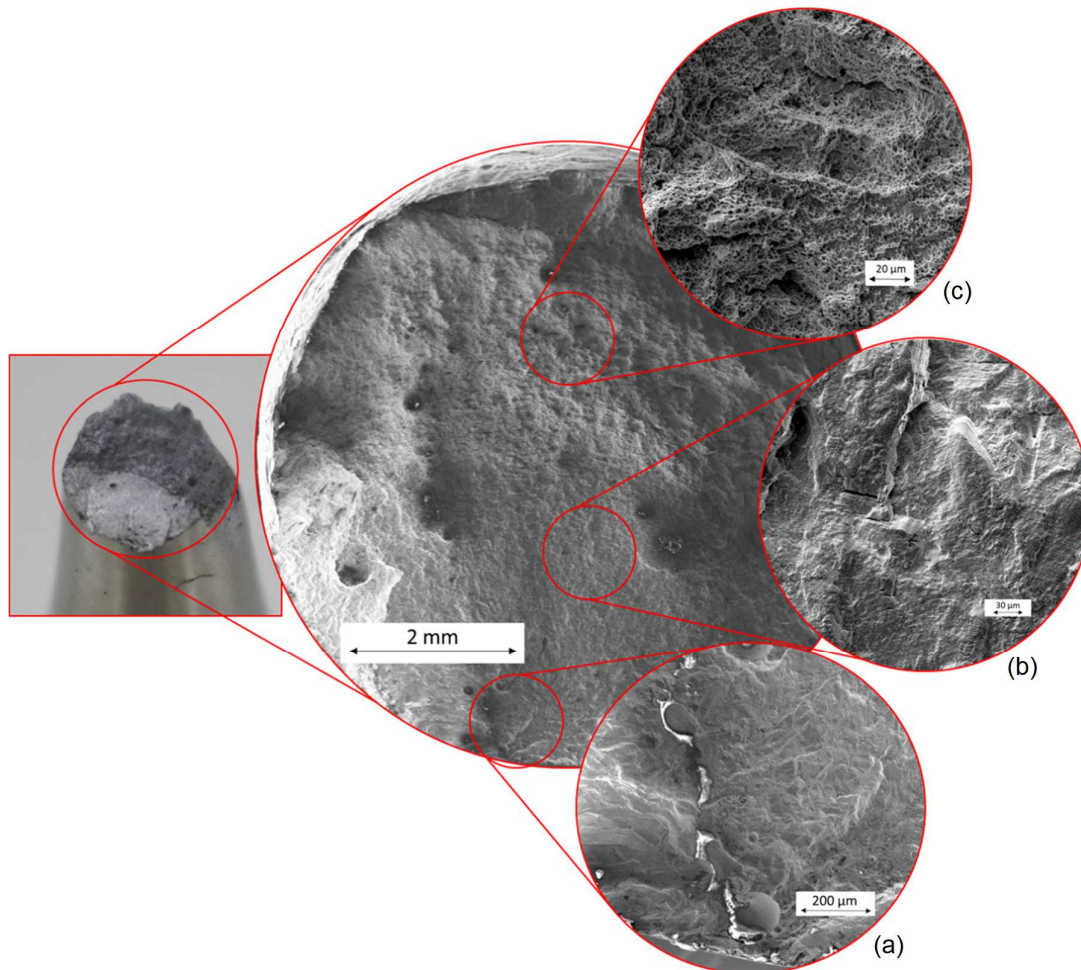


Fonte: Autor.

A amostra CP 6, submetida a uma tensão maior, apresentou uma maior região de ruptura catastrófica, caracterizada pela coloração mais escura da micrografia.

Também é visível uma acentuada deformação e ocorrência de outras trincas próximas a fratura, além de trincas secundárias presentes na região de propagação estável (Figura 32).

Figura 34 – Fractografia amostra CP 6, submetida a uma tensão de 360 MPa. (a) Defeito aparente na região de nucleação da trinca; (b) Região de propagação estável, caracterizada pela presença de estrias de fadiga; (c) Região de fratura catastrófica, com *dimples* característicos de fratura dúctil.



Fonte: Autor.

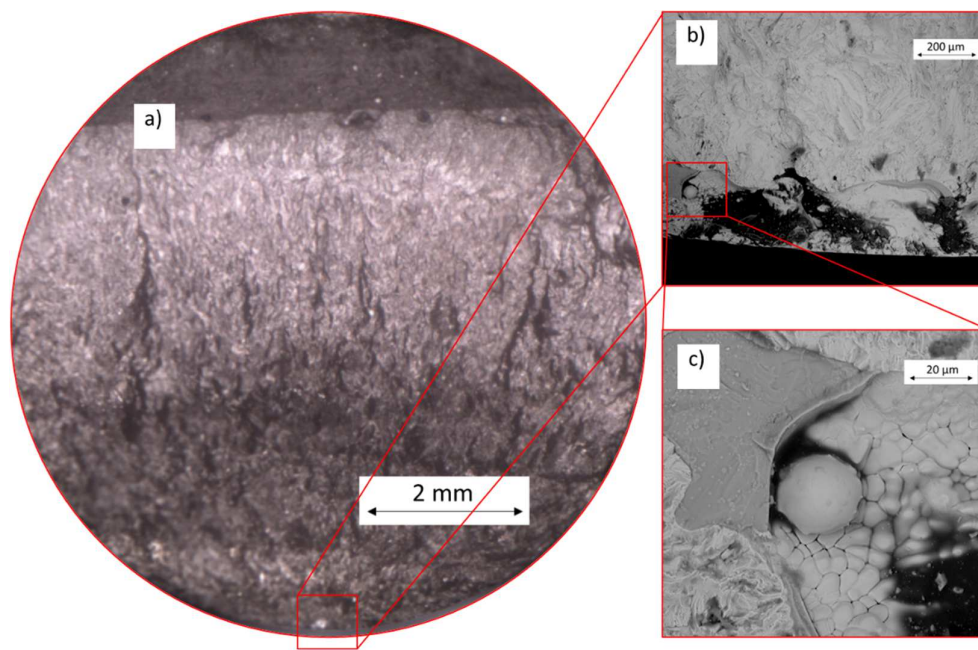
Apesar do número de ciclos não ser relevante para o *Staircase*, uma vez que nas fórmulas são considerados somente o número de corpos de prova que romperam ou suportaram, algumas ocorrências chamaram a atenção, como é o caso do corpo de prova 25, que foi submetido a uma tensão de 167 MPa, e rompeu-se ao atingir 1.359.519 ciclos, enquanto que outros três corpos de prova, 22, 23 e 24, submetidos a mesma tensão, atingiram a marca de 10 milhões de ciclos.

Em uma análise micrográfica usando o microscópio eletrônico de varredura, notou-se que, em aspectos gerais, a fratura apresentou semelhança ao corpo de prova 18, apresentado na Figura 32, com regiões de nucleação e propagação bem



definidas, conforme Figura 34a). No entanto, no ponto de nucleação da trinca, visualizou-se um grande defeito, Figura 34b), onde é possível ver inclusive a presença de partículas de pó não fundidas Figura 34c). Isto indica que a presença de defeitos superficiais ou sub-superficiais, funcionam como concentradores de tensão e podem reduzir significativamente o limite de resistência à fadiga, LRF.

Figura 35 – Fractografia do corpo de prova 25, submetido a uma tensão de 167 MPa. Onde vemos: a) as regiões de nucleação, propagação e ruptura; b) defeito no ponto de iniciação da trinca; c) detalhe de partícula não fundida.



Fonte: Autor.

## 5.5 LINEARIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N OBTIDA PARA OS DADOS DOS TESTES DE FADIGA AXIAL.

Nesta serão apresentadas as equações e resultado usados para a determinação da curva S-N, utilizando todos os dados obtidos no estudo

Segundo Equação 5, temos:

$$N = C S^n$$

Onde podemos reescrevê-la para a forma S em função de N:

$$S = D N^m \quad (10)$$

em que:

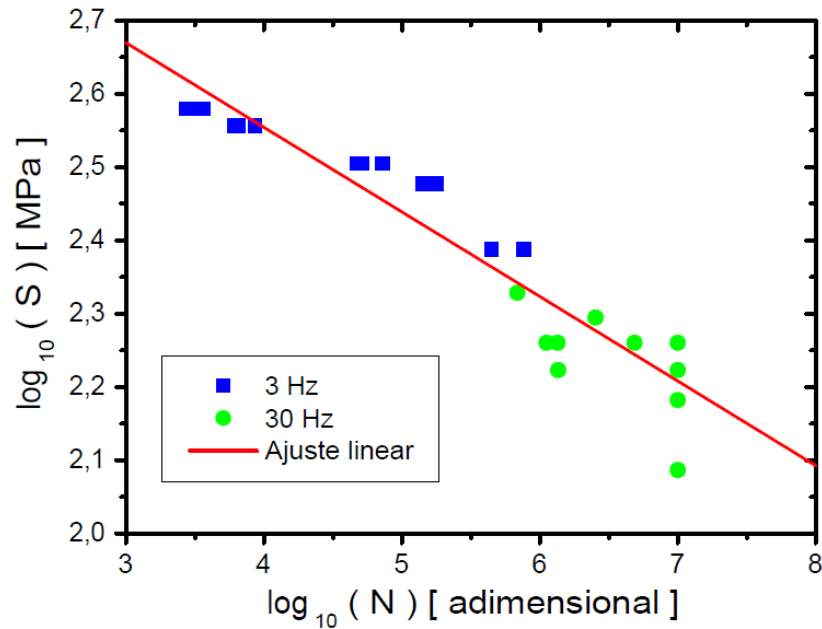
$$D = \frac{1}{C^m} \quad (11)$$

ou ainda:

$$C = \frac{1}{\sqrt[m]{D}} \quad (12)$$

Com os dados obtidos pelo gráfico  $\text{Log}(S) \times \text{Log}(N)$ , temos:

Figura 36 – Curva Log(S) x Log(N), para os dados de fadiga.



$$\log_{10} S = \log_{10} D + m \log_{10} N \quad (13)$$

Onde:

$$\log_{10} D = 3,01594$$

Portanto:

$$D = 10^{3,01594} = 1037,3851$$

$$m = -0,11543$$

Substituindo estes valores na Equação 10, temos:

$$S = 1037,38 N^{-0,11543} \quad (14)$$

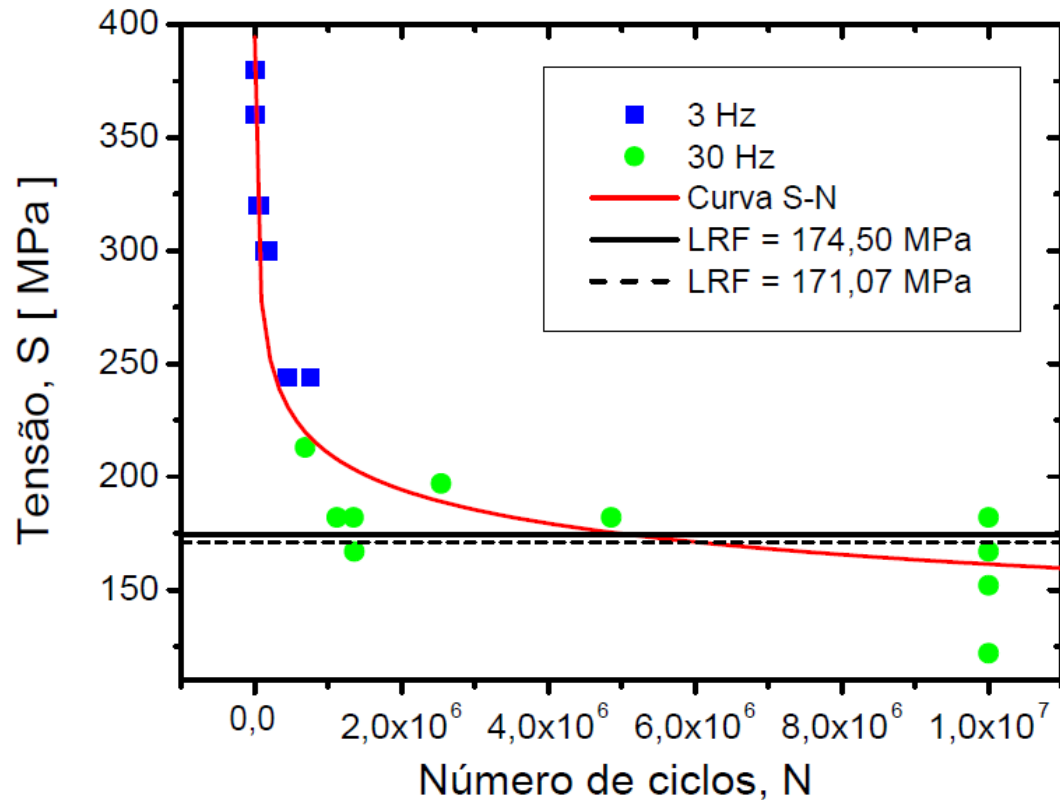
Com coeficiente de correlação  $R$  de:

$$R = -0,954$$

Representando graficamente a Equação 14, temos a curva S-N, para os dados obtidos pelo ensaio de fadiga axial, conforme Figura 33. A linha contínua, conforme indicação na legenda, representa o Limite de Resistência à Fadiga (LRF),

obtido pelo método *Staircase*, descrito na seção 5.1. Já alinha tracejada foi obtida por média aritmética das tensões de alto ciclo, para comparação.

Figura 37 – Curva S-N para o aço inoxidável AISI 316L, produzido por manufatura aditiva.



Fonte: Autor.

Quando observamos o Quadro 3, somente um dos artigos encontrados mostra a deposição pelo método L-DED, onde a avaliação do comportamento em fadiga é feita por ensaios cíclicos. A imensa maioria dos resultados trata de deposições por L-PBF.

## 5.6 CUSTOS DO PROJETO

Neste capítulo apresentaremos os custos envolvidos no desenvolvimento deste projeto.

A Tabela 17 apresenta o tempo total de impressão de cada fabricação. Considerando que outras peças foram fabricadas com os corpos de prova de fadiga e

levando-se em consideração o peso de cada uma, considera-se que do tempo total, 60% foi dedicado ao corpos de prova de fadiga.

Tabela 17 – Tempos de fabricação dos corpos de prova.

Fabricação ( <i>Build</i> )	Tempo de impressão
1	08h20min00
2	08h38min00
3	08h17min00
4	08h19min00
<b>Tempo total de impressão</b>	33h34min
<b>Corpos de prova de Fadiga (60%)</b>	20h08min

Fonte: Autor.

A Tabela 18 apresenta o custo, considerando a hora máquina praticada atualmente pelo Instituto SENAI de Inovação em Processamento à Laser.

Tabela 18 – Custo de impressão dos corpos de prova pelo processo L-DED.

Tempo de impressão	Custo de Fabricação [R\$/h]	Custo Total [R\$]
20h08min	835,00	16.816,90

Fonte: Autor.

A Tabela 19 apresenta o custo do pó utilizado para fabricação. Durante o processo, grande parte do pó é perdido, seja por partículas que fundem parcialmente ou não ficam retidas na poça de fusão, ou na passagem de uma peça para outra durante a execução das camadas, haja visto que neste momento há interrupção do laser, no entanto o fluxo de pó é constante em todo o processo. Para este trabalho o rendimento do processo é foi de cerca de 16%, ou seja, para cada 100 kg de pó, somente 16 kg, tornaram-se efetivamente peças prontas. Portanto, a quantidade de pó apresentada, considera que o peso final dos corpos de prova, foi somente 16% de todo o pó inserido no equipamento, e também considera o peso para todas as quatro fabricações (*builds*).

Tabela 19 – Custo e quantidade de pó metálico utilizado para convecção dos CP's.

Peso Total CP's [g]	Quantidade utilizada para rendimento 16% [g]	Total para 4 builds [g]	Custo Unitário [R\$/g]	Custo Total [R\$]
1576	9850	39400	0,17159	6.760,65

Fonte: Autor.

A Tabela 20 apresenta o custo do ensaio de fadiga, considerando todos os corpos de prova utilizados no estudo, e o preço praticado atualmente pelo LATECME, que é o laboratório anexo ao ISI-Laser. Neste custo, está contemplado também, a usinagem dos corpos de prova e o corte para retirada do substrato.

Tabela 20 – Custo do ensaio de fadiga axial.

Ensaio de Fadiga Axial	Custo Unitário [R\$]	Custo Total [R\$]
29	1.750,00	50.750,00

Fonte: Autor.

Salienta-se que o estudo foi custeado por um projeto do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Laser, juntamente com a Agência Nacional de Petróleo, ANP, sendo o total apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Custo total do estudo.

Etapa	Custo [R\$]
Fabricação dos Corpos de Prova	16.816,90
Pó Metálico	6.760,65
Ensaio de Fadiga Axial	50.750,00
<b>TOTAL</b>	<b>74.327,55</b>

Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÃO

De uma forma geral, este trabalho buscou determinar uma curva *S-N* para o aço inoxidável AISI 316L, produzido por MA, com a tecnologia L-DED, visando suprir a carência de estudos com estas características, conforme explicitado na RSL.

Os resultados do ensaio mecânico de tração, apresentaram coerência com o exposto em outros estudos sobre o AISI 316L, produzido por MA e previsto na Norma ASTM A240-22A (ASTM, 2022).

O ajuste linear da curva *S-N* obtida apresentou resultado satisfatório, tendo um coeficiente de correlação de 0,945 em que a constante “D” e o expoente “m”, foram determinados.

O LRF determinado pelo método *Staircase*, apresentou resultado de 174,50 MPa, equivalente à 29% do Limite de Resistência à Tração. Este valor está abaixo do apresentado pela literatura para aços em geral, que é de 35% à 65%, (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012) podendo estar relacionado aos defeitos subsuperficiais encontrados nas fraturas, ou seja, concentradores de tensão, sendo que em nenhuma delas a trinca nucleou a partir de defeitos localizados mais no centro do corpo de prova.

As fraturas dos corpos de prova apresentaram as regiões bem definidas, não diferenciando das fraturas comumente encontradas em outros tipos de aços.

Considerando a confecção dos corpos de prova e execução dos ensaios de fadiga, o custo total do trabalho foi de R\$ 74.327,55.

O entendimento do comportamento do Aço AISI 316L, produzido por MA, utilizando a tecnologia L-DED, principalmente relacionados aos esforços cíclicos ainda podem ser muito explorados, pois variáveis como sentido de deposição, parâmetros de processo, condição superficial e tratamentos térmicos podem ter grande influência e não apresentaram muitos dados na literatura. Já para tecnologia L-PBF, o aço já vem sendo estudado com mais frequência.

Além disso, outras possibilidades como tratamentos térmicos, ou até mesmo de condição superficial do corpo de prova, podem ser temas interessantes para estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM STP588-EB**: Manual on Statistical Planning and Analysis. West Conshohocken, 1975.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E8/E8M-16**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E468-18**: Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM F138-19**: Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673). West Conshohocken, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM A182-21**: Standard Specification for Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings and Valves and Parts for High-Temperature Service. West Conshohocken, 2021a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E466-21**: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken, 2021b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ISO/ASTM 52900-21**: Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology. West Conshohocken, 2021c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM A240-22A**: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for. West Conshohocken, 2022.

AFKHAMI, S.; DABIRI, M.; PIILI, H.; BJÖRK, T. Effects of manufacturing parameters and mechanical post-processing on stainless steel 316L processed by laser powder bed fusion. **Materials Science And Engineering**: A, v. 802, p. 140660, jan. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2020.140660>. Acesso em: 27 set. 2022.

BLAKEY-MILNER, B.; GRADL, P.; SNEDDEN, G.; BROOKS, M.; PITOT, J.; LOPEZ, E.; LEARY, M.; BERTO, F.; DUPLESSIS, A. Metal additive manufacturing in aerospace: a review. **Materials & Design**, v. 209, p. 110008, nov. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>. Acesso em: 18 set. 2022.

BORGES, D. G. **Caracterização de trocadores de calor compactos fabricados pela tecnologia de fusão em leito de pó a laser**. 2020. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Automotiva, Campus Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218373>. Acesso em: 03 out. 2022.



CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2013. 817 p.

CARBÓ, H. M. **Aços Inoxidáveis**: aplicações e especificações. São Paulo: Arcelor Mittal, 2008. 54 p.

CARPENTER Additive Technology, Disponível em: Disponível em: <https://www.carpenteradditive.com/technical-library>. Acesso em: 12 out. 2022.

CASATI, R.; LEMKE, J.; VEDANI, M. Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 32, n. 8, p. 738-744, ago. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2016.06.016>. Acesso em: 23 ago. 2022.

CERUTI, A.; MARZOCCA, P.; LIVERANI, A.; BIL, C. Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: the role of augmented reality and additive manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 516-526, 4 fev. 2019. Oxford University Press (OUP). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>. Acesso em: 03 out. 2022.

CHANG, I.; ZHAO, Y. **Advances in Powder Metallurgy: properties, processing and applications**. Cambridge, Uk: Woodhead Publishing Limited, 2013. 624 p.

CRONSKÄR, M.; BÄCKSTRÖM, M.; RÄNNAR, L.E. Production of customized hip stem prostheses – a comparison between conventional machining and electron beam melting (EBM). **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 5, p. 365-372, 26 jul. 2013. Emerald. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-07-2011-0067>. Acesso em: 20 jul. 2022.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, n. 8, 2011, Porto Alegre. **Anais do 8º CBGDP – Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto**. Porto Alegre: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, p. 1-12.

D'ANDREA, D.; GATTO, A.; GUGLIELMINO, E.; RISITANO, G.; SANTONOCITO, D. A comparison on static and fatigue behaviour between traditional and SLM AISI 316L. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 1, n. 36, p. 1-6, 11 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-022-2103-5>. Acesso em: 01 jun. 2022.

DEEV, A.A.; KUZNETKOV, P.A.; PETROV, S.N. Anisotropy of Mechanical Properties and its Correlation with the Structure of the Stainless Steel 316L Produced by the SLM Method. **Physics Procedia**, v. 83, p. 789-796, 2016. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.081>. Acesso em: 25 out. 2022.

DUVAL-CHANEAC, M.S.; GAO, N.; KHAN, R.H.U.; GILES, M.; GEORGILAS, K.; ZHAO, X.; REED, P.A.S. Fatigue crack growth in IN718/316L multi-materials layered structures fabricated by laser powder bed fusion. **International Journal of Fatigue**, v.

152, p. 106454, nov. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106454>. Acesso em: 11 nov. 2022.

GALLINA, A. L.; DIAS, B. V.; RODRIGUES, P. R. P. Application of the Stainless Steel in the Hydrogen Generation as Fuel. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 224-234, 08 dez. 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140016>. Acesso em: 05 set. 2022.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2012. 365 p.

GIORDANO, E. J.; ALONSO-FALEIROS, N.; FERREIRA, I.; BALANCIN, O. Electrochemical behavior of two austenitic stainless steel biomaterials. **Revista Escola de Minas**, SciELO, v. 63, n. 1, p. 159-166, mar. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672010000100027>. Acesso em: 15 set. 2022.

GUTJAHR, J. **Análise do Reuso da Matéria-prima e sua Influência no Processo Laser Metal Deposition Aplicado à Manufatura Aditiva de Peças Metálicas**. 2020. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Campus Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

HANNIBAL, M.; KNIGHT, G. Additive manufacturing and the global factory: disruptive technologies and the location of international business. **International Business Review**, v. 27, n. 6, p. 1116-1127, dez. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibusrev.2018.04.003>. Acesso em: 05 set. 2022.

KOK, Y.; TAN, X.P.; WANG, P.; NAI, M.L.S.; LOH, N.H.; LIU, E.; TOR, S.B. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review. **Materials & Design**, v. 139, p. 565-586, fev. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>. Acesso em: 05 out. 2022.

KUMAR, S. P.; ELANGO VAN, S.; MOHANRAJ, R.; RAMAKRISHNA, J.R. Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 7907-7920, 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.567>. Acesso em: 23 set. 2022.

LEWANDOWSKI, J. J.; SEIFI, M. Metal Additive Manufacturing: a review of mechanical properties. **Annual Review of Materials Research**, v. 46, n. 1, p. 151-186, 1 jul. 2016. Annual Reviews. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>. Acesso em: 12 nov. 2022.

LIVERANI, E.; TOSCHI, S.; CESCHINI, L.; FORTUNATO, A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 249, p. 255-263, nov. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>. Acesso em: 23 ago. 2022.

LUIZ, L. A.; HENKE, S. L.; KURELO, B. C. E. S.; SOUZA, G. B. de; ANDRADE, J. de; MARINO, C. E. B. Aços inoxidáveis aplicados na indústria petroquímica: estudo comparativo da resistência à corrosão por técnicas eletroquímicas. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM, v. 17, n. 1, p. 61-70, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20201960>.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 7ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2013. 296 p.

MEDINA, H. V.; NAVEIRO, R. M. Materiais avançados: novos produtos e novos processos na indústria automobilística. **Production**, v. 8, n. 1, p. 29-44, jun. 1998. SciELO. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65131998000100003>.

MILAN, M. T; MALUF, O.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W.W. **Metais: Uma visão objetiva**. 2. ed. São Carlos - SP: Editora Cubo, 2014. 284 p.

NANKALI, M.; AKBARI, J.; MORADI, M.; BEIRANVAND, Z. M. Effect of laser additive manufacturing parameters on hardness and geometry of Inconel 625 parts manufactured by direct laser metal deposition. **Optik**, v. 249, p. 168193, jan. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168193>.

NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172-196, jun. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

PONTICELLI, G. S.; PANCIROLI, R.; VENETTACCI, S.; TAGLIAFERRI, F.; GUARINO, S. Experimental investigation on the fatigue behavior of laser powder bed fused 316L stainless steel. **Cirp Journal of Manufacturing Science And Technology**, v. 38, p. 787-800, ago. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.007>.

RIEMER, A.; LEUDERS, S.; THÖNE, M.; RICHARD, H.A.; TRÖSTER, T.; NIENDORF, T. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 120, p. 15-25, abr. 2014. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.03.008>.

ROIRAND, H.; HOR, A.; MALARD, B.; SAINTIER, N. Effect of laser scan strategy on microstructure and fatigue properties of 316L additively manufactured stainless steel. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, p. 1-17, 3 out. 2022. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/ffe.13845>.

SARGINI, M.I.M.; MASOOD, S.H.; PALANISAMY, S.; JAYAMANI, E.; KAPOOR, A. S. Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 4601-4605, 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.010>.

SCOPUS. SciVerse Scopus. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 09 dez. 2022.

SHRESTHA, R.; SIMSIRIWONG, J.; SHAMSAEI, N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel parts: effects of layer orientation and surface roughness. **Additive Manufacturing**, v. 28, p. 23-38, ago. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.011>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. São Paulo-SP: Edgard Blücher, 2006. 646 p.

SPIERINGS, A.B.; STARR, T.L.; WEGENER, K. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. **Rapid Prototyping Journal**, v. 19, n. 2, p. 88-94, 1 mar. 2013. Emerald. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302932>. Acesso em: 17 set. 2022.

STERN, F.; BECKER, L.; CUI, C.; TENKAMP, J.; UHLENWINKEL, V.; STEINBACHER, M.; BOES, J.; LENTZ, J.; FECHTE-HEINEN, R.; WEBER S. Improving the Defect Tolerance of L-PBF Processed 316L Steel by Increasing the Nitrogen Content. **Advanced Engineering Materials**, p. 2200751, 2 ago. 2022. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/adem.202200751>. Acesso em: 23 ago. 2022

SURYAWANSHI, J.; PRASHANTH, K.G.; RAMAMURTY, U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. **Materials Science and Engineering**, v. 696, p. 113-121, jun. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.058>. Acesso em: 12 set. 2022.

TERRASSA, K. L.; HALEY, J. C.; MACDONALD, B. E.; SCHOENUNG, J. M. Reuse of powder feedstock for directed energy deposition. *Powder Technology*, v. 338, p. 819-829, out. 2018. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.065>. Acesso em: 28 ago. 2022

TEOH, S. Fatigue of biomaterials: a review. **International Journal of Fatigue**, v. 22, n. 10, p. 825-837, nov. 2000. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0142-1123\(00\)00052-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0142-1123(00)00052-9). Acesso em: 23 set. 2022.

THIESSEN JR, A. **Selection of processing parameters for the laser directed energy deposition process applied to additive manufacturing: a methodological proposal**. 2021. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Campus Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227036>. Acesso em: 02 ago. 2022

TYFLOPOULOS, E.; LIEN, M.; STEINERT, M. Optimization of Brake Calipers Using Topology Optimization for Additive Manufacturing. **Applied Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1437, 5 fev. 2021. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app11041437>. Acesso em: 27 set. 2022.

VOLOSKOV, B.; EVLASHIN, S.; DAGESYAN, S.; ABAIMOV, S.; AKHATOV, I.; SERGEICHEV, I. Very High Cycle Fatigue Behavior of Additively Manufactured 316L Stainless Steel. **Materials**, v. 13, n. 15, p. 3293, 24 jul. 2020. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/ma13153293>. Acesso em: 11 set. 2022.

WEGENER, T.; WU, T.; SUN, F.; WANG, C.; LU, J.; NIENDORF, T. Influence of Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on Microstructure, Tensile and Low-Cycle Fatigue Behavior of Additively Manufactured Stainless Steel 316L. **Metals**, v. 12, n. 9, p. 1425, 29 ago. 2022. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/met12091425>. Acesso em: 29 jul. 2022.


WOHLERS Report 2019 - **3D Printing and Additive Manufacturing: State of the Industry**, Fort Collins, Colorado, 2019. 369 p.

ZENG, F.; YANG, Y.; QIAN, G. Fatigue properties and S-N curve estimating of 316L stainless steel prepared by SLM. **International Journal of Fatigue**, v. 162, p. 106946, set. 2022. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106946>. Acesso em: 30 set. 2022.

ZHAN, J.; YANG, Y.; BI, H.; LI, M.; GU, H. High temperature oxidation behavior of type 444 stainless steel in synthetic automotive exhaust gas. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 530–541, 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.014>. Acesso em: 23 jul. 2022.

ZHANG, M.; SUN, C.; ZHANG, X.; GOH, P. C.; WEI, J.; HARDACRE, D.; LI, H. High cycle fatigue life prediction of laser additive manufactured stainless steel: a machine learning approach. **International Journal of Fatigue**, v. 128, p. 105194, nov. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105194>. Acesso em: 29 set. 2022.

## ANEXO A – Orçamento para os processos de impressão e ensaios de fadiga

 <b>INSTITUTO SENAI</b> <small>DE INOVAÇÃO</small>		<b>ISI SISTEMAS DE MANUFATURA E LASER</b> <small>RUA ARNO WALDEMAR DOHLER, 308 - SANTO ANTONIOJOINVILLE - CEP: 89218-153          FONE/FAX: (47)3441-7754 / 3441-7790 CNPJ: 03.774.688/0055-48 - I.E.: ISENTO          E-mail: <a href="mailto:ste@sc.senai.br">ste@sc.senai.br</a></small>		<b>Proposta CRM Nº.:</b>  <b>Data: 15/10/2022</b>
CLIENTE:	Trabalho de Pesquisa Interna – ISI Laser	CONTATO:	Clayton	
CNPJ:		TELEFONE:		
INSCRIÇÃO ESTADUAL:		E-MAIL:		
ENDEREÇO:				
<b>DESCRIÇÃO SERVIÇO:</b> Serviço de análise e caracterização de materiais.				
<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ENSAIOS</b>	<b>VALOR UNITÁRIO</b>	
Serviços Técnicos Especializados (STE)	1	Impressão de corpos de prova por deposição direta à laser L-DED	R\$ 835,00/hora	
	1	Ensaio de fadiga axial com usinagem de corpo de prova	R\$ 1750,00	
<b>OBJETIVO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>O objetivo do presente STE é realizar o ensaio de fadiga para levantamento de curva SN, em corpos de prova produzidos com aço inoxidável AISI 316L pelo método de deposição direta à laser, L-DED.</li> </ul>				
<b>FORMALIZAÇÃO DO ACEITE DA PROPOSTA</b>				
<p>Em caso de aceite, por gentileza assinar, escanear este documento e, ou encaminhar ordem de compra para o e-mail <a href="mailto:ste@sc.senai.br">ste@sc.senai.br</a>;</p>				
<b>NOME:</b> _____				
<b>ASS:</b> _____				
<b>FUNÇÃO:</b> _____				
<b>DATA:</b> ____/____/____				

## ANEXO B – Certificado fornecido pelo fabricante do pó AISI 316L

# Höganäs

### CERTIFICADO DE ANALISE Pág.: 1(1)

Nr lote 2963068 Dt impressão 2019-10-23  
 Nr pedido 0010492845 Entrega 2329354 Expedição 3507243

Nome do item  
**PO BASE INOX 316 L-5520**  
 Código Produto  
 111904

Cliente 95416  
 SERVIÇO NACIONAL APREND INDUSTRIAL  
 RUA ARNO WALDEMAR DOHLER  
 SANTO ANTONIO  
 JOINVILLE  
 SANTA CATARINA

PO BASE INOX 316 L-5520

Quantidade 360,0 Kg Nossa Referência AF 2366

Data produção 2019-07-24 Qtd produzida Kg

	Resultados dos Testes		Especificação	
	Unid		MIN	MAX
<b>PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>				
C	0.019	%	0.030	%
Mo	2.5	%	3.0	%
Ni	12.7	%	14.0	%
<b>Ferro e Balanço</b>				
Mn	1.5	%	2.0	%
Cr	16.9	%	18.0	%
Si	0.7	%	1.0	%
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>				
Densidade Aparente (Hall)	4.08	g/cm3		
Escoamento	17.5	sec/50g		
<b>GRANULOMETRIA</b>				
+150 Microns	1.62	%	3.00	%
+125 Microns	12.69	%	25.00	%
+106 Microns	16.43	%		
+71 Microns	44.80	%		
+63 Microns	14.83	%		
+53 Microns	8.95	%	15.00	%
+45 Microns	0.58	%	1.00	%
-45 Microns	0.10	%	0.20	%

Aprovado por



Quality Control Manager

13:00:55  
2019-10-23

BR1

Inspection certificate  
 EN 10 204 3.1

COAIMMS480AH-A4

ADMINISTRATION / FACTORY  
 Höganäs Brasil Ltda  
 Av. Ricierei Jose Marcatto  
 110 - Vila Suíça  
 Mogi das Cruzes - SP - Cep: 08810-020  
 BRÁSI L

Telephone  
 +55 11 4793-7711  
 Telefax  
 +55 11 4793-7708

Intermediary Bank: JPMorgan Chase  
 Bank, N.A Address bank: 4 New York  
 Plaza floor 15, zip code: 10004.  
 Swift Code: CHASUS33.  
 Account nr: 544705690

Beneficiary Bank: Itaú Unibanco S.A.  
 Swift code: ITAUBRSP  
 For further credit to: HOGANAS BRASIL LTDA Branch number: 2212 Account  
 number: 005611  
 IBAN: BR26 6070 1190 0221 2000 0005 611C 1

www.hoganas.com.br